

平成 26 年度 修士論文

ローコスト地震計による
超高密度地震観測に関する研究

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

都市基盤環境学域 探査工学研究室

13885416 鈴木宏伸

指導教官 小田義也 准教授

目次

第 1 章 序論

1.1 背景、目的	...1
1.2 本論文の構成	...6

第 2 章 高密度地震観測とローコスト地震計の現状と課題

2.1 日本における高密度地震観測の現状と課題	...7
2.1.1 K-NET, KiK-NET (防災科学研究所)	...7
2.1.2 SUPREME (東京ガス)	...8
2.2 ローコスト地震計の現状と課題	...9

第 3 章 ローコスト地震計と観測システムの概要

3.1 ローコスト地震計概要	...16
3.1.1 制御部	...17
3.1.2 通信部	...17
3.1.3 センサ部	...18
3.2 MEMS 型加速度センサのノイズ低減	...21
3.2.1 MEMS 型加速度センサの重合	...21
3.2.2 2 次の RC ローパスフィルタ	...22
3.3 ローコスト地震計のデータ収集方法の概要	...26
3.3.1 ローコスト地震計のデータ収集方法	...26
3.3.2 計測震度と 3 成分合成波形最大値の相関	...28

第 4 章 ローコスト地震計と従来型地震計との比較実験

4.1 実験概要	...30
4.2 実験結果	...32
4.3 まとめ	...32

第5章 ローコスト地震計を用いた自然地震観測

5.1 観測概要	... 41
5.2 観測結果	... 46
5.2 まとめ	... 47

第6章 結論

6.1 まとめ	... 48
6.2 今後の課題	... 48

第1章 序論

1.1 背景・目的

大地震による被害を軽減するためには、地震発生直後の初期対応を適切かつ迅速に整えることが極めて重要であり、そのためには各地の地震動を正確かつ迅速に把握することが不可欠である。

現在日本には、高密度地震観測網の代表的なものに、気象庁が設置している地震計や防災科学技術研究所（以下、防災科研）が設置している強震観測網（K-NET, KiK-Net）、消防庁が整備している震度情報ネットワークなどがある。

K-NET（Kyoshin-Net：全国強震観測網）とは、全国を約 20km 間隔で均一に覆う 1,000 箇所以上の強震観測施設からなる強震観測網であり、KiK-Net（Kiban-Kyoushin Net：基盤強震観測網）は、全国約 700 箇所に配置され、各観測施設に観測用の井戸が採掘されており地表と地中双方に強震計が設置されているのが特徴である。

震度情報ネットワークは、各都道府県の全市区町村で「1 市区町村 1 観測点」の原則として、震度計設置を目標にしたものである。整備の際、気象庁の震度計及び防災科研の強震観測網の強震計が設置されている市区町村については、それらを活用している。

現在公表されているこれらの震度観測点は合わせて約 5,300 地点（表 1-1）設置されており、単純計算で平均約 8.4km 四方につき一つの震度観測点が存在することになる。

しかし一方で、地震動は地下構造や周辺の地形により複雑に影響をうけるため、地震計の観測密度以上に局所的に変化することが分かっている。

例えば、宮城県石巻市桃生町を対象として 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による建物被害及び町内の常時微動観測を行った小田・戸田(2011)によれば、石巻市桃生町の中心を通る県道 21 号線（東浜街道）沿い約 3km の範囲で 310 棟の建物を八幡ほか(2001)の被害尺度(表 1-2)を用いて分類し、各被害ランクに建物棟数を示した調査結果が、図 1-1 のように示されており、被害の大きいランク A、ランク B が町の中心に集中していることが分かる。

また、長野県白馬村における 2014 年 11 月 22 日に発生した長野県北部の地震（神城断層地震）による建物被害（表 1-3）をみると、白馬村の中で堀之内・三日市場地区に全壊・半壊の被害が集中していた（図 1-3、1-4）。被害が小さかった白馬村役場に設置されている K-NET の観測点（図 1-5）では最大加速度 589.0gal を観測したが、役場から南に 5km 強の地点に位置する堀之内・三日市場地区では、役場付近とは異なるさらに大きな揺れが発生したことが予想される。しかし、実際どのような地震動に見舞われたかは不明である。さらに、堀之内地区内においても被害の大きさに差が見られた。

これらの事実は、非常に狭い範囲でも地震動が大きく異なることを強く示唆している。設置されている地震計はその地点の加速度や震度を測っているにすぎず、その地域全体の加速度や震度を示しているとは言い難い。

このような地域内の詳細な地震動を把握するために、地震計が設置されていない地点の地震動を推定する様々な手法が提案されているが、正確に地震動を推定することは現状では困難である。したがって、地域内の詳細な地震動を正確に把握するためには、実際に観測することが不可欠であり、それを実現するには、超高密度な地震観測網が必要である。しかし、従来型の地震計は設置や管理に膨大なコストが必要であることから実現は難しい。そこで本研究では、近年開発されている小型で安価な MEMS 型加速度センサや入手が容易で安価なマイコンボード等を利用することによって、従来型の地震計よりも大幅にコストを削減したローコスト地震計の開発を行うとともに、ローコスト地震計による観測を実施し、超高密度観測の有用性について検討した。

表 1-1 日本の震度観測点設置数

	気象庁	地方公共団体	K-Net	KiK-Net	合計
全国合計	664	2,927	約1,000	約700	約5,300

表 1-2 八幡ほか(2001)の被害尺度

Ranks of house damage	Type of house damage
A	元の建物の形が想像できない or 全面つぶれている
B	屋根が傾き地面に接している or 今にも接しそう
C	遠目から見てわかるほど傾いている
D	壁が折れている・よく見ると傾いている and ドア(窓)が完全に閉まらない・ガラスが割れている
E	基盤がずれている・基盤にひびが入っている or 外装がはがれている・外装にひびが入っている
F	そのほか

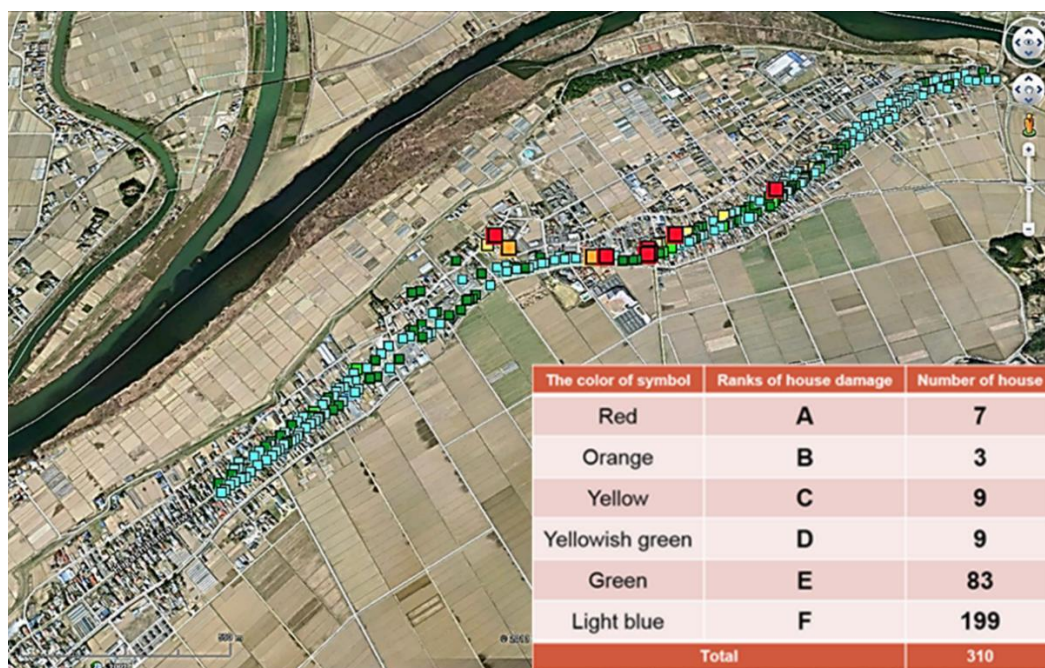


図 1-1 小田・戸田(2011)の建物被害調査結果

表 1-3 長野県神城断層地震による白馬村における建物被害

地区名	全壊		半壊		一部損壊		計
	住宅	倉庫等	住宅	倉庫等	住宅	倉庫等	
内山					1		1
佐野					1		1
沢渡						1	1
三日市場	4	8	3	7	10	6	38
堀之内	23	41	13	10	33	23	143
深空				2		2	4
八方口						1	1
大出					7	4	11
嶺方		3	1		3	6	13
塩島						1	1
野平					2	2	4
青鬼					1	1	2
立の間		1				2	3
落倉						1	1
合計	27	53	17	19	58	50	224

(白馬村 HPhttp://www.vill.hakuba.lg.jp/quake_nagano_north/damage/damage.htmlより引用)



図 1-3 堀之内地区の被害の様子①



図 1-4 堀之内地区の被害の様子②



図 1-5 白馬村役場に設置されている K-NET の観測点

1.2 本論文の構成

本論文は全 6 章で構成されている。以下に、本論文の構成とその概略を述べる。

第 1 章では、序論として本論文の背景・目的を論述した。

第 2 章では、高密度地震観測網をローコスト地震計の現状と課題について述べた。日本には、様々な高密度観測網が存在する。例えば、東京ガス（株）が行っている SUPREME（約 0.78 km^2 に一か所センサを設置）がある。しかし、観測エリアが限られていることや商用のため利用に制限があることなどの問題点がある。また、ローコスト地震計（須貝,2012）においては小さな地震に対しての精度が不十分であることやデータ通信が不安定なことを問題点として示した。

第 3 章では、ローコスト地震計とそれを用いた観測システムの概要を述べた。ローコスト地震計は制御部・通信部・センサ部から構成されている。制御部には AVR マイコンと入出力ポートを備えた基板（Arduino Uno）、通信部には第 3 世代移動通信システム（3G 回線）を利用した 3G シールド（TABrain 社製）、センサ部には MEMS 型アナログ加速度センサ（Kionix 社製 KXR94-2050）を使用し、16bit の AD コンバータ（Texas Instruments 製 ADS1115）でデジタル化した。MEMS 型アナログ加速度センサは従来型の地震計に比べ、ノイズレベルが高いため、複数センサの重合や 2 次の RC ローパスフィルタを利用することにより S/N 比の向上を行った。また、ローコスト地震計は地震波形を一時的に保存するためのメモリ容量が小さいため、リアルタイムで 3 成分合成加速度を計算し、2 分に一度その期間の最大加速度値のみを 3G 回線でクラウドサーバに送信するシステムとした。

第 4 章では、ローコスト地震計の精度を従来型地震計との比較実験により検討した。振動台を用いて様々な周波数と加速度振幅の正弦波を入力し、従来型地震計を基準としてローコスト地震計の精度を評価した。実験の結果、ローコスト地震計は十分な精度を持つこと、そして、2 次の RC ローパスフィルタが地震動の主要な周波数帯域を残しノイズを低減していることを確認した。

第 5 章では、実際に地震動がどれほど局所的に変化するか検証するため、ローコスト地震計を用いて自然地震観測を行った。一般的な地震被害想定は 250m メッシュ単位で行われることが多い。したがって、被害想定上は同一の地震動として扱われる 250m メッシュの範囲内に 3 つのローコスト地震計を設置し、実測した加速度の差異を検出し、超高密度観測の有用性を検討する。

第 6 章では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べた。

第2章 高密度地震観測とローコスト地震計の現状と課題

本章では、日本における高密度地震観測とローコスト地震計の現状と課題について述べる。

2.1 日本における高密度地震観測の現状と課題

2.1.1 K-NET, KiK-NET (防災科学技術研究所)

K-NET (Kyoshin-Net:全国強震観測網) とは、1996 年 6 月に防災科学技術研究所が運用を開始した、全国を約 20km 間隔で均一に覆う 1,000 箇所以上の強震観測施設からなる強震観測網である。均質な観測条件で記録するために、各観測施設は、一部の例外を除き統一した企画で建設され、地表に強震計が設置されている。KiK-Net (Kiban-Kyoushin Net:基盤強震観測網) は、全国約 700 箇所 (図 2-1) に配置され、各観測施設に観測用の井戸が採掘されており地表と地中双方に強震計が設置されているのが特徴である。強震観測網で観測された強震記録は直ちに、防災科学技術研究所本所にあるデータセンターに送信され、強震観測網 HP より一般に公開されている。

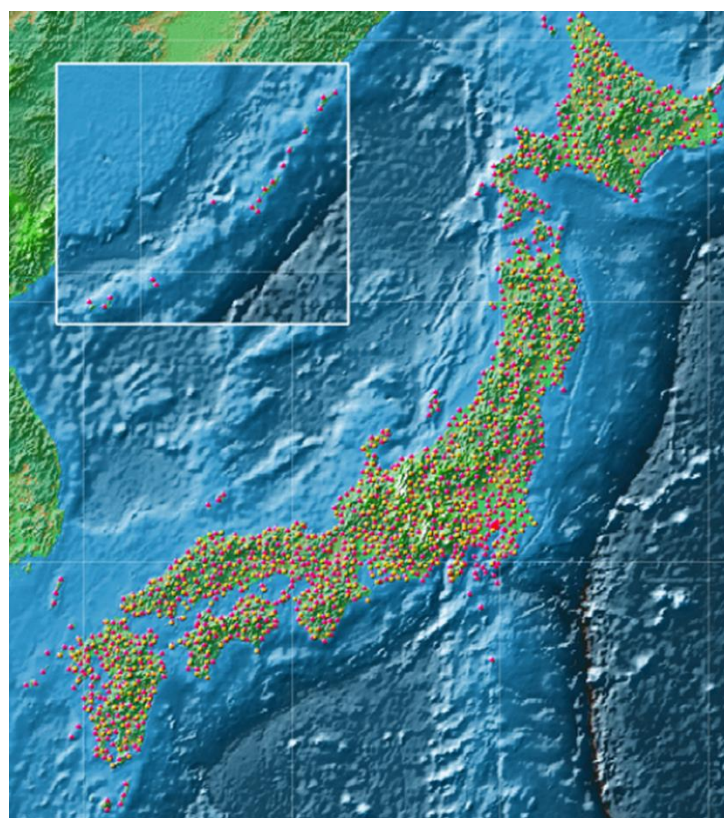


図 2-1 強震観測網、観測点地図 (強震観測網 HP より引用
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/kyoshin.shtml>)

2.1.2 SUPREME（東京ガス）

SUPREME は、2001 年 7 月に東京ガスが運用を開始した地震防災システムである。東京ガスが低圧ガスを供給するエリア内 4,000 か所の地区ガバナ（整圧器）に地震センサー（SI センサー）を設置している（図 2-2）。約 1km²に 1 基という世界でも類をみない高密度な地震防災システムである。センサーから得られた情報は、導管や構造物に被害を及ぼすような地震を検知すると、自動的にガス供給を遮断するシステムに利用されているほか、jishin.net を通じて、観測情報として、SI 値、震度相当値、GAL 値が公開されており、地域防災に役立っている。しかし、観測エリアが東京ガスの供給エリアに限られることや、商用のため、有料であることなどの制限がある。

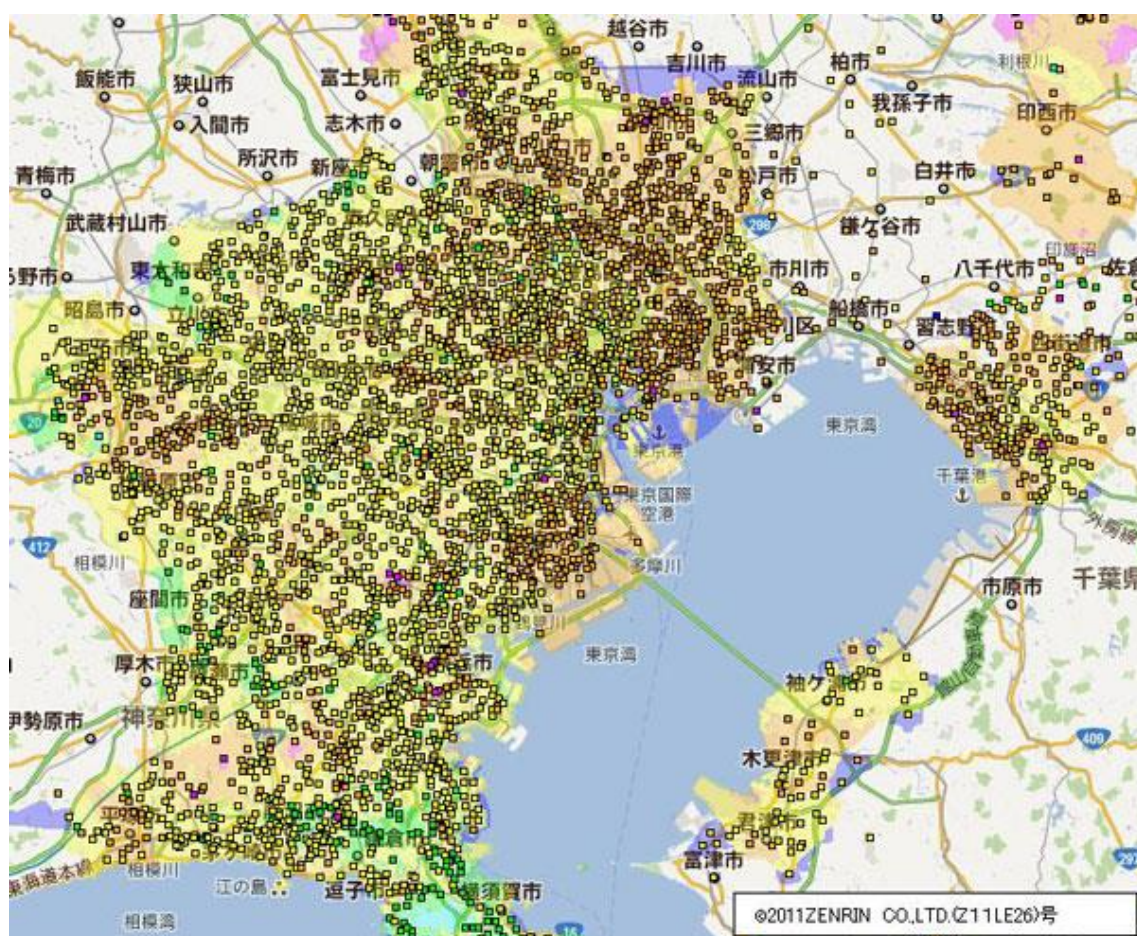


図 2-2 東日本大震災における SUPREME 観測図（SUPREME HP より引用）

2.2 ローコスト地震計の現状と課題

須貝（2012）では安価な小型地震計を多数配置し、既存のネットワークに頼らない新しい地震観測網である超高密度地表加速度描画システム（SUGAI システム）の構築を目指し、図 2-3 のような、安価で小型地震計の開発が行われた。SUGAI システムとは新たに開発した安価な小型地震計でメッシュ型の無線ネットワークを構築し、地表加速度のモニタリングを行うシステムである。

小型地震計の全体像



図 2-3 小型地震計の全体図（須貝（2012）より引用）

SUGAI システムではメッシュ型の無線ネットワークを構築に、ZigBee と呼ばれる無線通信規格のチップを搭載した無線通信モジュールを用いた。ZigBee は Wi-Fi や Bluetooth といった他の無線企画と比べて、最大通信速度が遅いものの、接続できるデバイス数が多い特徴がある。これを生かした ZigBee の最大の特徴は図 2-4 のようなメッシュ型のネットワークを構築できることである。Wi-Fi や Bluetooth の場合、一つの端末に複数の機器を接続しようとする場合、端末から通信距離内の範囲までしか通信を行うことが出来ないがルータと呼ばれる端末であると同時に通信の中継も出来るデバイスタイプを用いれば、一つの ZigBee 受信器に対して複数のルータ端末を経由することで ZigBee 単体での通信距離を補うことができるというものである

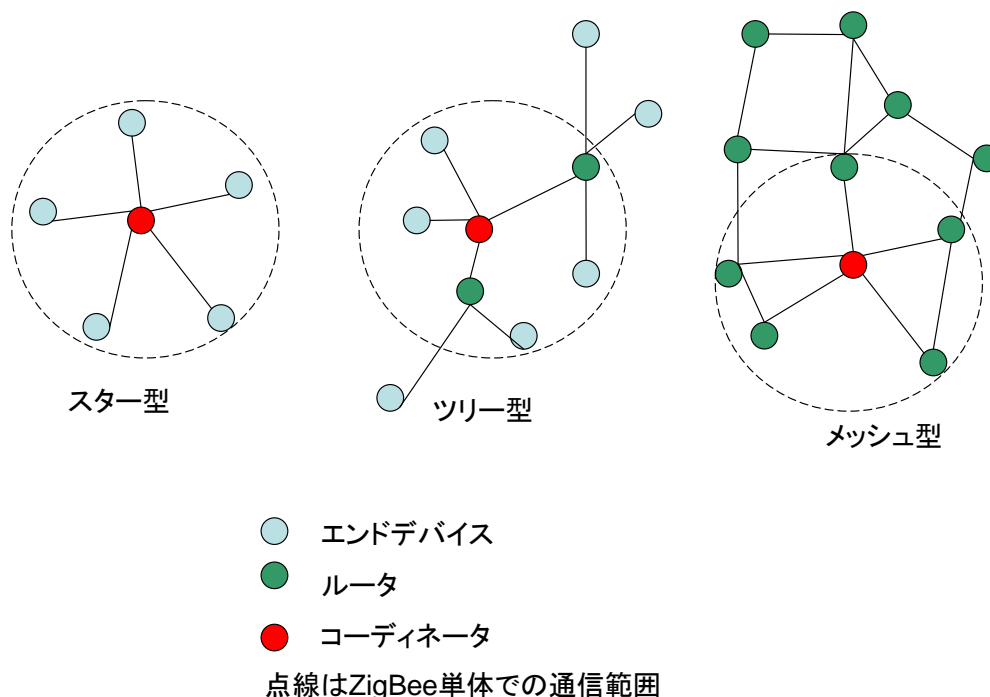


図 2-4 ネットワーク構成 (須貝 (2012) より引用)

しかし、2012 年 9 月に ZigBee の一つである XBee を使い、首都大学東京構内において通信距離に関する実験を行った結果、屋外の障害物の無い直線上で 15m 離れると通信が不安定になりデータの欠落が発生し、50m 離れると通信が止まってしまった。障害物が多い屋内に地震計を設置することを考えると、さらに有効な通信範囲は狭くなってしまふ。このことから、ZigBee によるメッシュ型ネットワークの構築は非常に不安定であり、実現は難しいと考えられる。

また、須貝（2012）では加速度センサに BMA180（BOSCH 社製）という MEMS 型加速度センサを用いた。BMA180 は 14bit の分解能をもつデジタル出力の加速度センサである。須貝（2012）において行われた従来型地震計（CV-374, 東京測振製）との比較を行った結果、最大加速度が 1000gal, 200gal のケースでは、加速度波形、フーリエスペクトルともに従来型地震計とよく一致した（図 2-5～2-6）が、最大加速度 10gal のケースでは、加速度波形、フーリエスペクトルともにあまり一致せず（図 2-7）、振動を何も加えていない状態でノイズが±10gal 程度発生していることがわかった（図 2-8）。10gal は気象庁における震度に換算すると震度 3 程度にあたり、ノイズが非常に大きいことがわかる。

以上のことから、小型地震計にはデータ通信が不安定であること、ノイズが大きいことが問題点であり、改良が必要である。

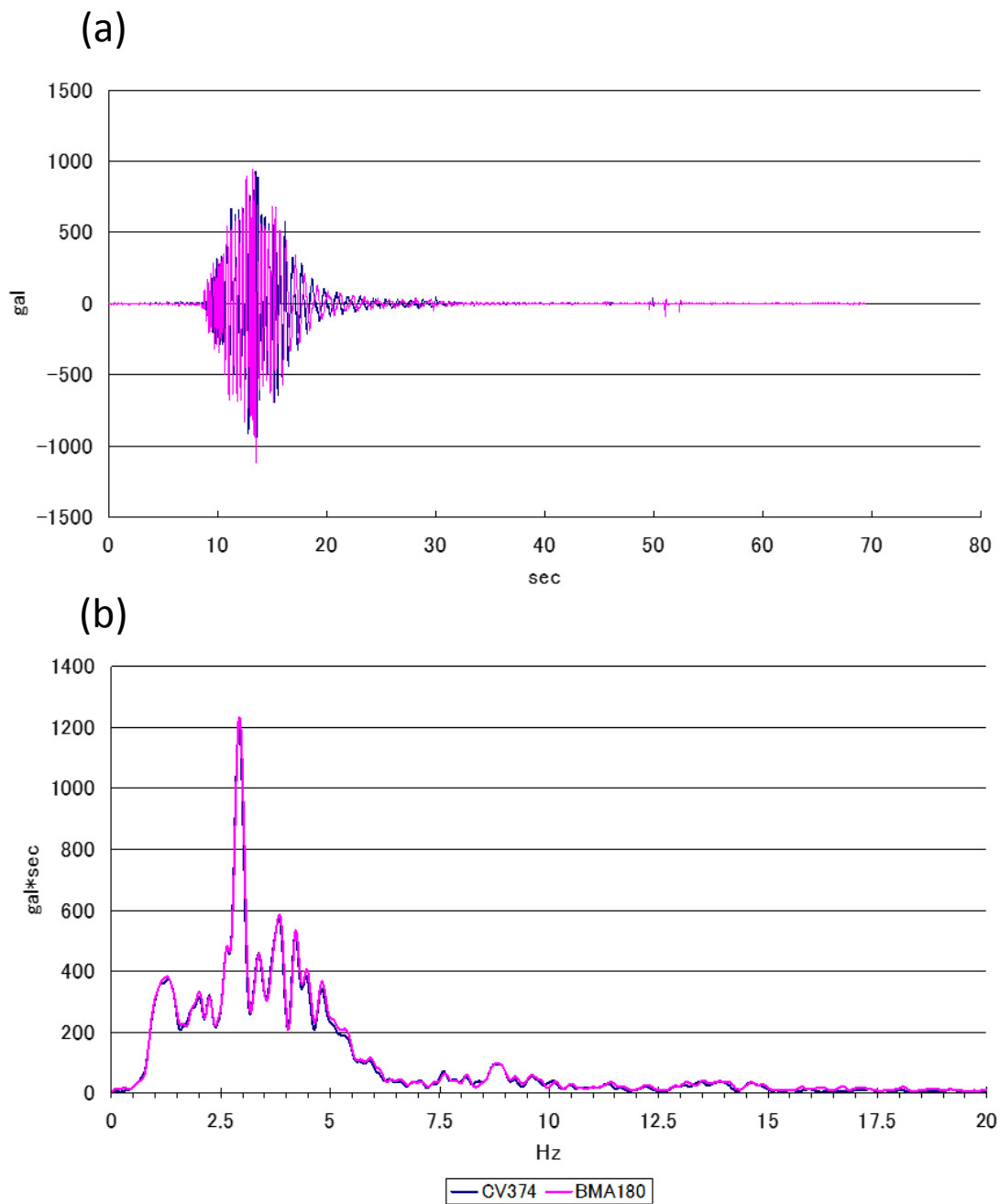


図 2-5 加速度波形 (a) 及び、フーリエスペクトル (b) の比較
(BMA180 Max≒1000gal) (須貝 (2012) より引用)

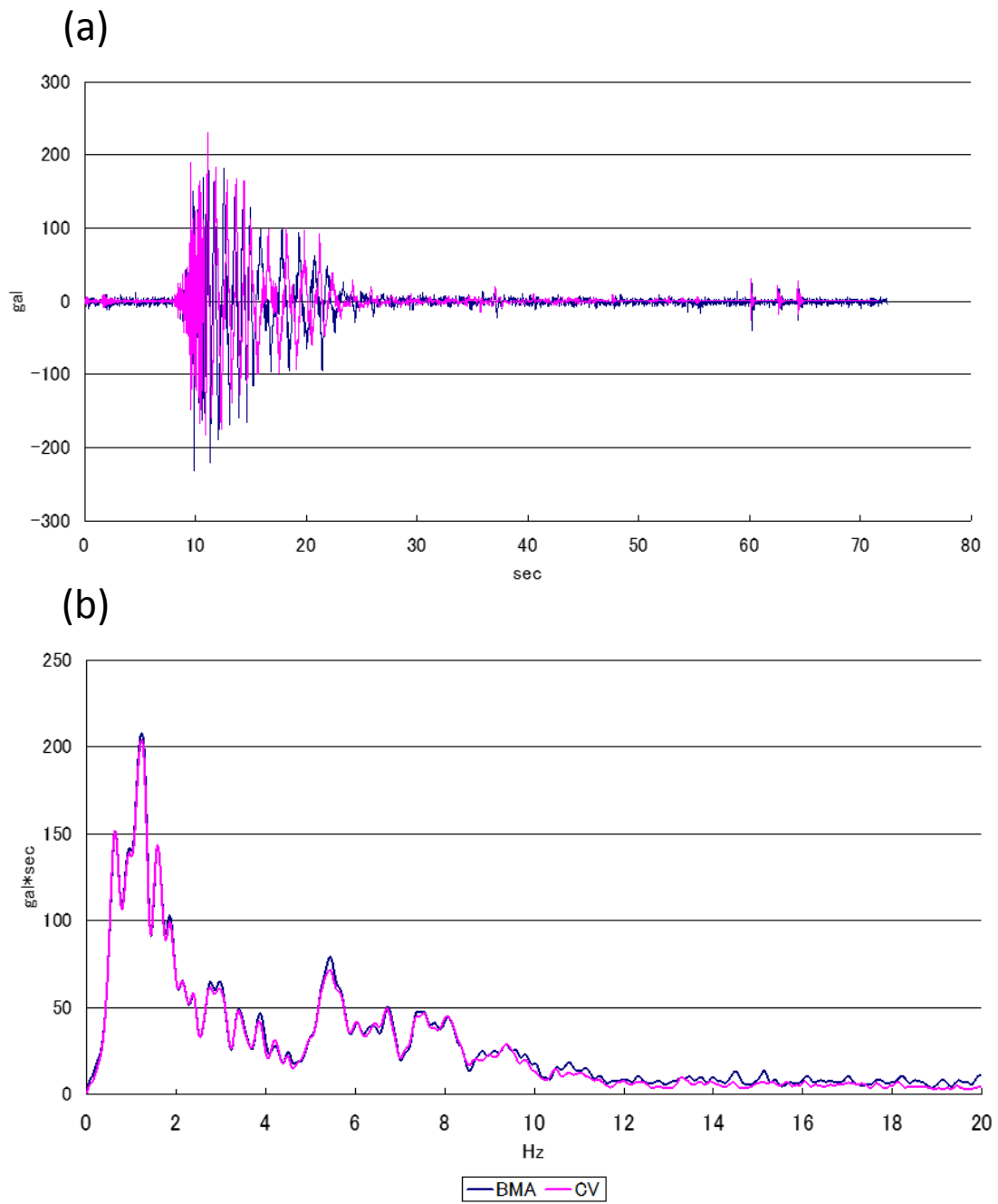


図 2-6 加速度波形 (a) 及び、フーリエスペクトル (b) の比較
(BMA180 Max≒200gal) (須貝 (2012) より引用)

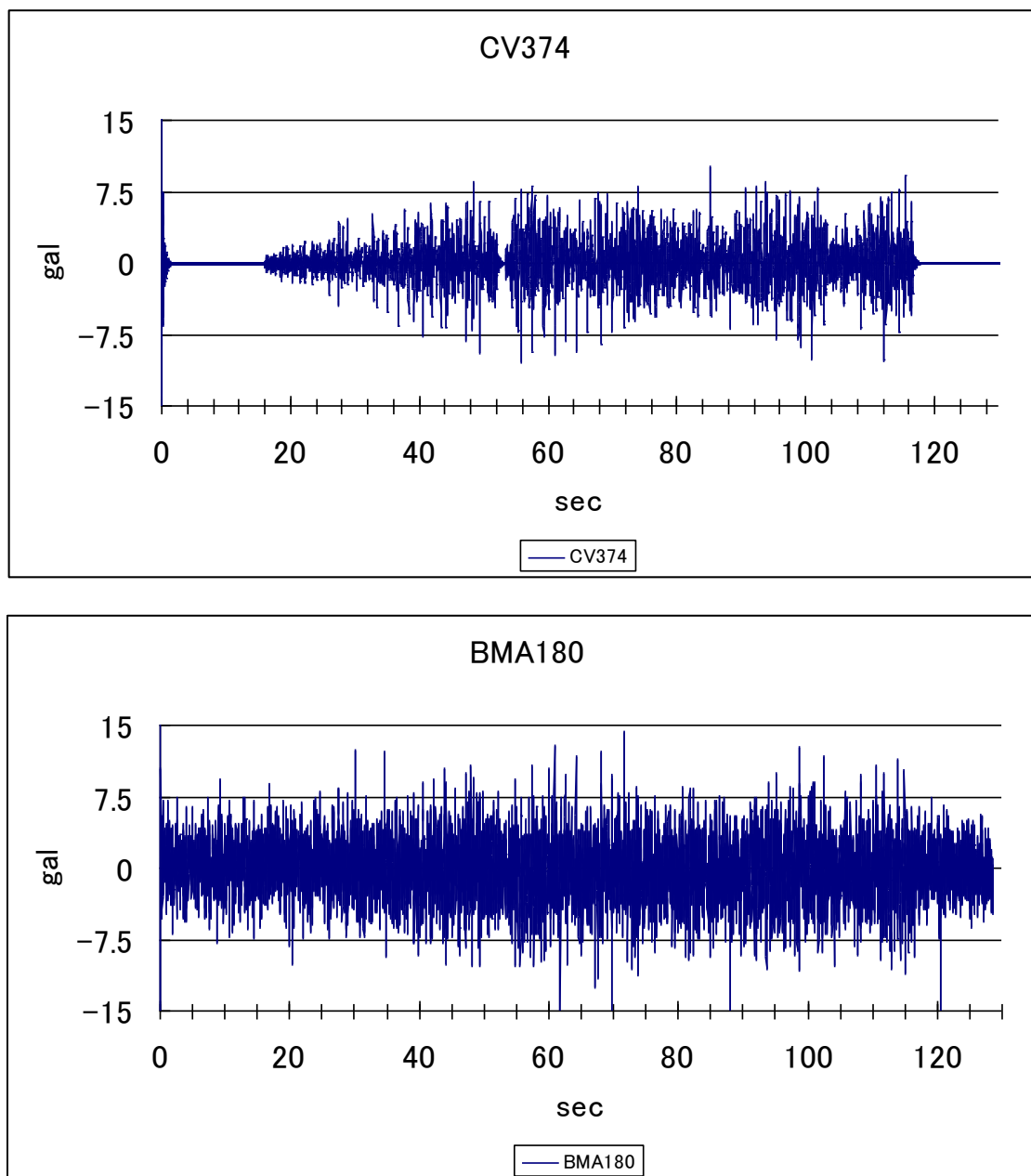


図 2-7 加速度波形 (Max≒10gal) (須貝 (2012) より引用)

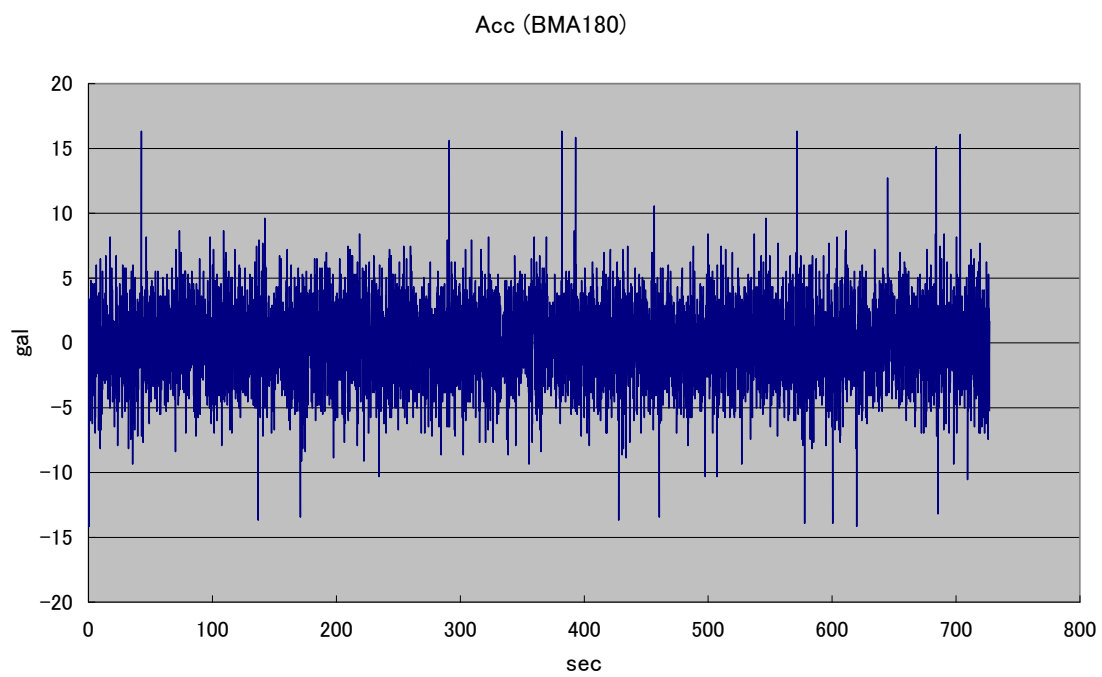


図 2-8 平穩時の BMA180 (須貝 (2012) より引用)

第3章 ローコスト地震計と観測システムの概要

本章では、開発したローコスト地震計の概要とローコスト地震計を用いた観測システムの概要について述べる。

3.1 ローコスト地震計概要

本研究で開発したローコスト地震計は、すべての行動を制御するマイコンである制御部、データを3G通信によってクラウドに送信する通信部、加速度の検知を行うセンサ部の3つの要素で構成されている(図3-1)。図3-2にローコスト地震計の写真を示す。製作費は5万円程度であり、一般的な従来型地震計の約1/20である。

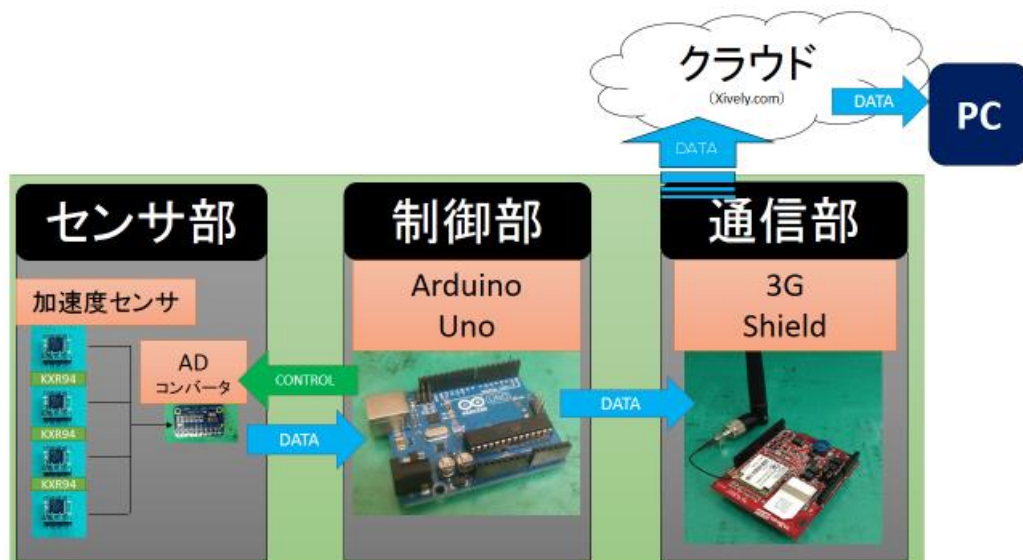


図 3-1 ローコスト地震計全体図



図 3-2 ローコスト地震計写真

3.1.1 制御部

センサ部・通信部の制御を行うため、制御部には **ArduinoUno** というマイコンボードを使用した。

Arduino はイタリアで発案、開発されたコンピュータ・システムであり、マイコンボードとプログラミング言語やプログラムを開発するためのソフトウェアなどを含めたものを指す。**Arduino** の IDE (**Integrated Development Environment**:統合開発環境) は初心者にもわかりやすいデザインになっている点やハードウェアを統一し、マイコンにプログラムを書き込む機能がボードや IDE に付いている点、シールドと言われる拡張ボードが多く開発されている点、二次利用が認められており多くの人が作品をインターネット上に公開しているため、ソフトウェアやスケッチ (プログラム) など手軽に利用できる点など、初心者にも簡単に利用できることが特徴となっている。

本研究では入手が容易であり、シールドが手軽に利用できるという利点から **Arduino** の中でもっとも標準的な **Arduino Uno** を使用した。

Arduino Uno は **Atmel** 社の **AVR Atmega328P** という 8 ビットのマイコンを搭載したマイコンボードである。Flash メモリ 32KB、SRAM 2KB、EEPROM 1KB の容量をもち、クロックスピードは 16MHz である。USB コネクタ・DC コネクタのどちらからも電源を供給できる点やシールドをそのままコネクタに指すだけで使える点など利便性が高い。10bit の A/D 変換を備えており、センサから出力された電圧値をデジタル値に変換することもできる。ただし、10 ビットの A/D 変換では測定範囲が $\pm 2G$ の場合、感度は 3.91gal であり地震観測を行うには荒すぎる。そのため、本研究では、別途に 16bit の AD コンバータを用いた。

3.1.2 通信部

須貝 (2012) においては **ZigBee** と呼ばれる無線通信規格のチップを搭載した無線通信モジュールを用いていたが、無線の有効な距離や安定性の問題から実用化が困難であった。そのため、本研究では、通信部に **TABrain** 社より販売されている IEM 版 3G シールド (以下 3G シールド) を使用した。

3G シールドとは、**Arduino** と接続が容易な 3G 通信機能をもつ拡張ボードである。3G 通信機能のほかに GPS 機能や SMS 送信機能を持つ、広域でのワイヤレス・センサネットワークを実現することが容易なツールである。3G シールドで利用している 3G 通信モジュール (韓国 AnyDATA 社の「DTW400-W」) は、付属している 3G アンテナとの組み合わせで日本の技術基準適合証明を取得しており、日本国内では使用可能になっている。

また、日本では NPO 法人 3G シールドアライアンスによるサポートがあり、ライブラリやプログラム例など多くの情報が提供・公開されているため、専門知識がなくても容易に利用することが可能である。3G シールドの利用事例として、農業用監視システ

ムや独居高齢者見守りシステム等がある。

本研究では、3G シールドを利用し、Xively.com というインターネット上のクラウドサーバにデータを送信している。Xively とはデバイスから送信されたデータを簡単なグラフ化し、保存、後日取り出しすることが無償でできるクラウドサービスである。

3.1.3 センサ部

センサ部には加速度を検知する MEMS 型加速度センサを使用した。

近年の MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術の発達により、半導体微細加工技術を応用した各種センサが大量かつ安定的に生産出来るようになっている。その代表的なものが MEMS 型加速度センサである。自動車のエアバックシステムに衝撃検出のために用いられたことから始まり、今日ではゲーム機、携帯電話機、デジタルカメラなど、多くの民生機器に搭載されている。

MEMS 型加速度センサは、加速度の測定範囲により分類され、一般的に約 20G 以下の測定範囲をもつ加速度センサを低 G 加速度センサ、それ以上の測定範囲をもつものを高 G 加速度センサとして分類される。また加速度の検出方式の違いにより、表 3-1 のように分類できる。このうち、本研究で用いた加速度センサは静電容量検出方式と呼ばれるものである。

加速度センサの構造および検出原理について、静電容量検出方式の加速度センサを例にして述べる。

ニュートンの法則より、ある重さ m の物体に加速度 a が働いたとき、物体に働く力 F は

$$F = ma \quad (1)$$

である。また、図 3-3 で示されたばね係数 k であるばねと重さ M の錘で構成された場合、移動距離を x とすると

$$F = kx \quad (2)$$

となり、求める加速度 a は

$$a = \frac{kx}{M} \quad (3)$$

である。

静電容量型は図 3-4 のようになり、移動距離を電極間の静電容量の変化により求めている。誘電率 ϵ 、極板面積 S 、極板間隔の初期値 d であり、極板間隔に x だけ変化が生じた際の静電容量の変化量 ΔC は

$$\Delta C = \frac{\epsilon S}{d-x} - \frac{\epsilon S}{d} \approx \frac{\epsilon S}{d} x = \frac{\epsilon S}{d} \frac{M}{k} a \quad (4)$$

であり、一定の電荷 Q を蓄積した状態ならば、静電容量の変化に応じて電極間の電圧 V も変化する。

$$\Delta V = \frac{Q}{\Delta C} \quad (5)$$

すなわち式 (4) と式 (5) より、加速度の変化を電圧の変化として検知するタイプが静電容量検出方式と言える。

表 3-1 MEMS 型加速度センサの分類 (アナログ・デバイセズ社 HP より引用)

	静電容量検出方式	ピエゾ抵抗方式	熱検知方式
原理	センサー素子可動部と固定部の容量変化を検出	センサー素子可動部と固定部を繋ぐバネ部分に配置したピエゾ抵抗素子により、加速度によってバネ部分に発生した歪みを検出	ヒーターにより筐体内に熱気流を発生させ、加速度による対流の変化を熱抵抗等で検出
特徴	センサー素子部はSiやガラスなどの安定した物質で構成。	比較的構造が単純で、素子からの出力が大きい。	可動部を持たないので、衝撃に強い。パッケージ容積と特性がトレードオフの関係にある。
精度	安定した物質で構成されるので、特に温特に優れる。	原理・構造要因により温度特性の直線性、感度の直線性がやや劣る。共振周波数が低い場合は外部振動による影響がある場合もある。	常温ノイズは比較的低い、感度の温特が低い。原理要因により、測定周波数帯域が狭い(数10Hz)。

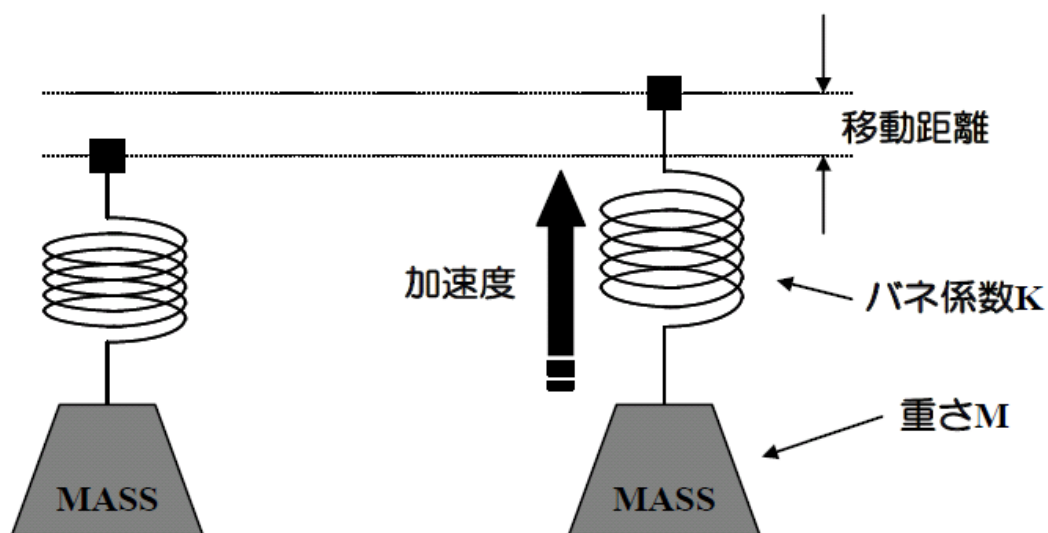


図 3-3 加速度計の原理 (アナログ・デバイセズ社 HP より引用)

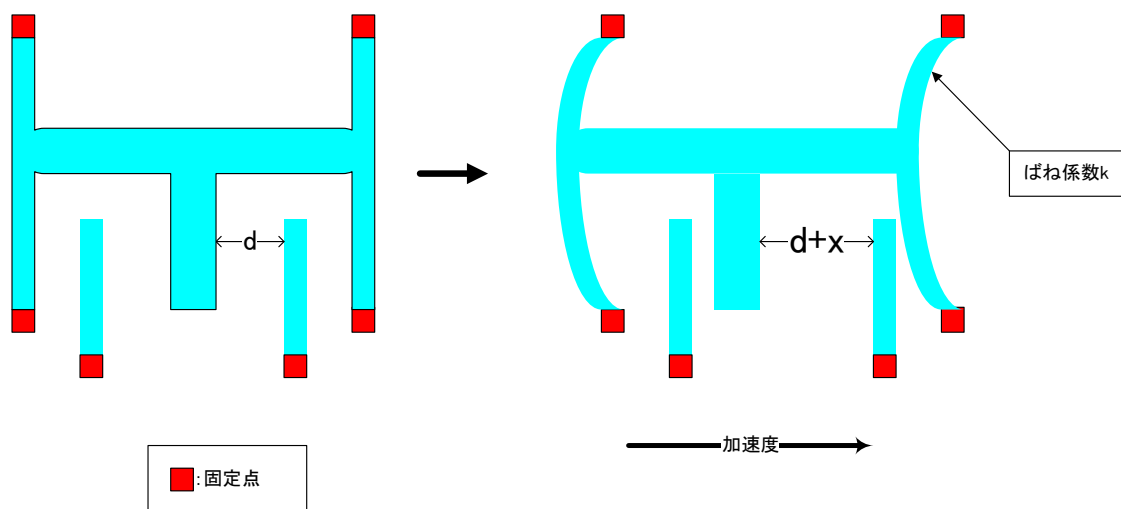


図 3-4 静電容量検出方式の加速度センサ（須貝（2012）より引用）

しかし、MEMS 型加速度センサは小型かつ安価である反面、従来の地震観測で用いられているようなサーボ型強震計や物理探査で用いられるジオフォンに比べて、ノイズが大きいことが大きな問題点となった。そこで、本研究では、3つの異なる MEMS 型加速度センサ（表 3-2）を比較し、ローコスト地震計に適切な MEMS 型加速度センサの検討を行った結果、ノイズが少なく、かつ安価で感度の高い KXR94-2050 を採用した。KXR94-2050 はアナログ出力であるため、ADS1115 という 16bitAD コンバータを使用した。

表 3-2 MEMS 型加速度センサ比較表

加速度センサ名	出力	ノイズ($\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	感度(gal/LSB)	消費電力(μA)	最小検出範囲	価格(JPY)	インターフェース
BMA180	デジタル	150	0.119	650-975	$\pm 1\text{G}$	2995	SPI/I2C
MMA8451Q	デジタル	99	0.244	6-165	$\pm 2\text{G}$	840	I2C
KXR94-2050	アナログ	45	※0.186	800-1250	$\pm 2\text{G}$	850	※I2C

※:A/Dコンバータ(ADS1115)に依存

3.2 MEMS 型加速度センサのノイズ低減

他のセンサに比べノイズが小さい KXR94-2050 でもピークトゥーピークで 2gal 程度のノイズが発生していた。そこで、本研究では下記の二つの方法を用いて、ノイズ低減を行った。

3.2.1 MEMS 型加速度センサの重合

KXR94-2050 を 4 つ並列に接続し、AD コンバータに接続した。これによって、AD コンバータへの入力電圧が 4 つの加速度センサの出力電圧の平均をとり、安定させることで S/N 比の向上を図った。S/N 比とは S(信号)と N(ノイズ)の比である。ノイズがランダムであれば理論上、S/N 比はセンサの重合数を n とすると \sqrt{n} 倍に向上する。そのため、センサ数が 4 つの場合 S/N 比は 2 倍となる。図 3-5 に KXR94-2050 が 1 つの場合と 4 つの場合のノイズレベルの比較を示す。わずかではあるが、ノイズレベルが小さくなり、効果があることがわかった。

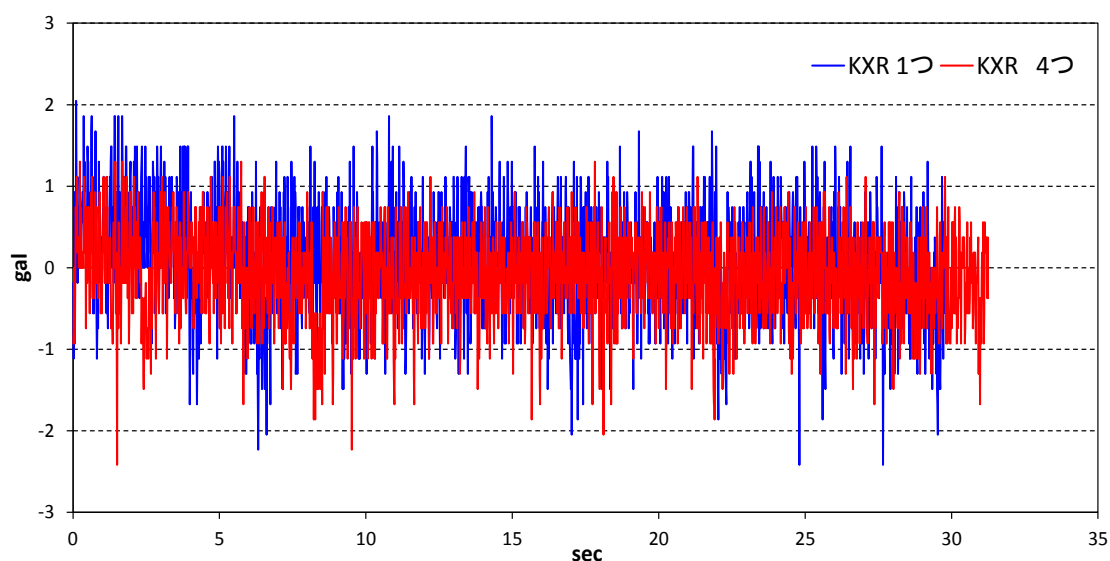


図 3-5 KXR の個数によるノイズレベルの比較

3.2.2 2 次の RC ローパスフィルタ

一般的に地震動の主な周波数帯域は $0.1 \sim 10\text{Hz}$ であり、地震観測において 10Hz より高い周波数成分はフィルタなどで除去することもある。そのため、図 3-6 のような、RC ローパスフィルタを利用し、地震動の主な周波数帯域のみを残し、高周波数帯域をカットしようと試みた。図 3-6 中の V_i 、 V_o はそれぞれ入力電圧、出力電圧を示す。RC ローパスフィルタとは、 R (抵抗)と C (コンデンサ)を直列に接続したシンプルな回路であり、1 次 RC ローパスフィルタのほかに、2 次 RC ローパスフィルタ (図 3-7) など次数が違いによって特性が異なる。減衰特性の比較 (図 3-8) を行ったところ、1 次 RC ローパスフィルタ ($R_1=8\text{k}\Omega$, $C_1=0.1\mu\text{F}$) よりも 2 次ローパスフィルタ ($R_1=8\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{k}\Omega$, $C_1=0.1\mu\text{F}$, $C_2=1\mu\text{F}$) の方が減衰特性を急に設定できるため、本研究では、2 次のローパスフィルタを利用した。使用した抵抗、コンデンサの値はそれぞれ、 $R_1=8\text{k}\Omega$, $R_2=1\text{k}\Omega$, $C_1=0.1\mu\text{F}$, $C_2=1\mu\text{F}$ である。また、この時の 2 次の RC ローパスフィルタの位相遅れを図 3-9 に示す。

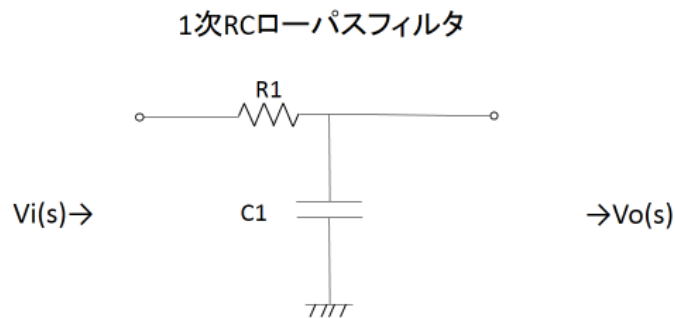


図 3-6 1 次 RC ローパスフィルタ回路図

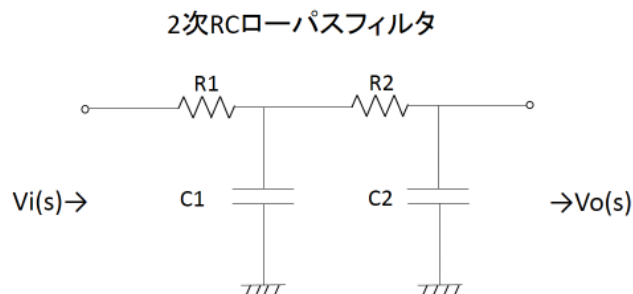


図 3-7 2 次 RC ローパスフィルタ回路図

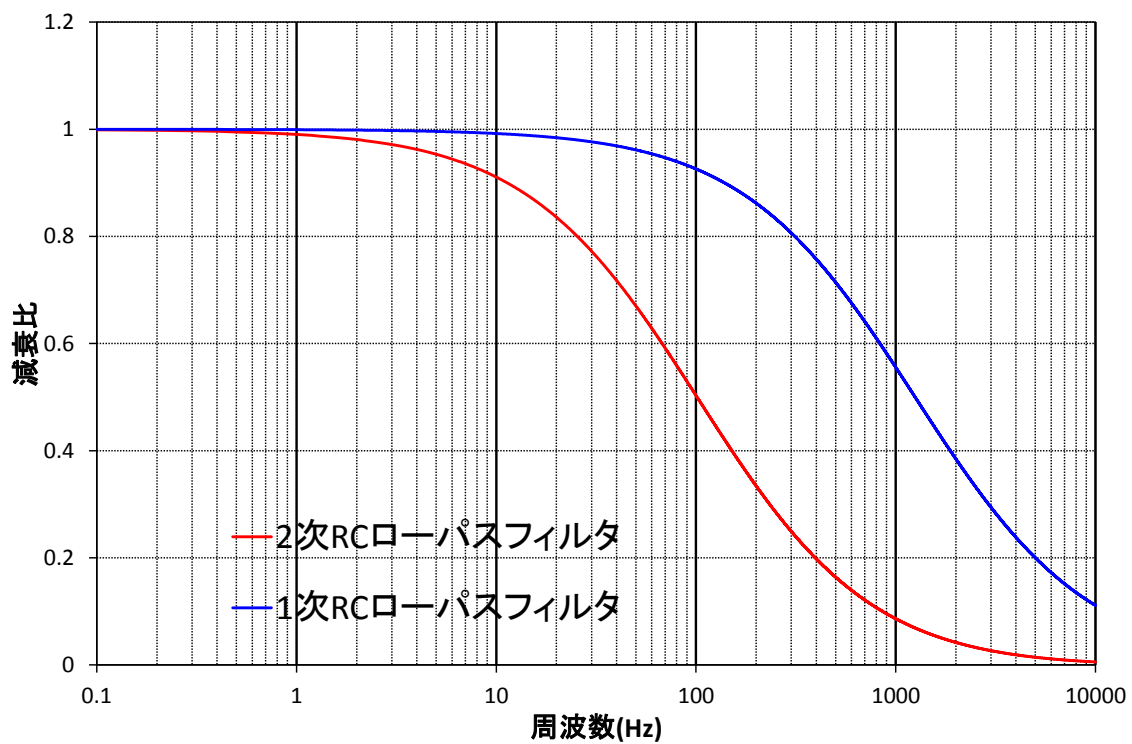


図 3-8 RC ローパスフィルタ減衰特性の比較

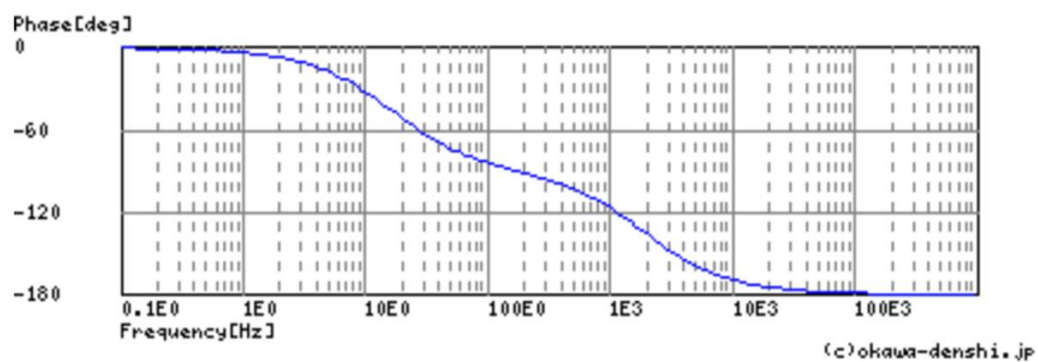


図 3-9 2 次の RC ローパスフィルタ位相特性

図 3-10 に 2 次 RC ローパスフィルタの有無によるノイズレベルの比較、図 3-11 にはフーリエスペクトルの比較を示した。ノイズレベルは 2 次 RC ローパスフィルタがないものに比べ、あるものの方が明らかに小さくなることがわかった。また、フーリエスペクトルにおいては、地震動の主な周波数帯域(0.1~10Hz)はあまりカットすることなく、高周波数になるにつれて大きくカットしている。このことから、2 次の RC ローパスフィルタは適切にノイズのみをカットしていることがわかった。

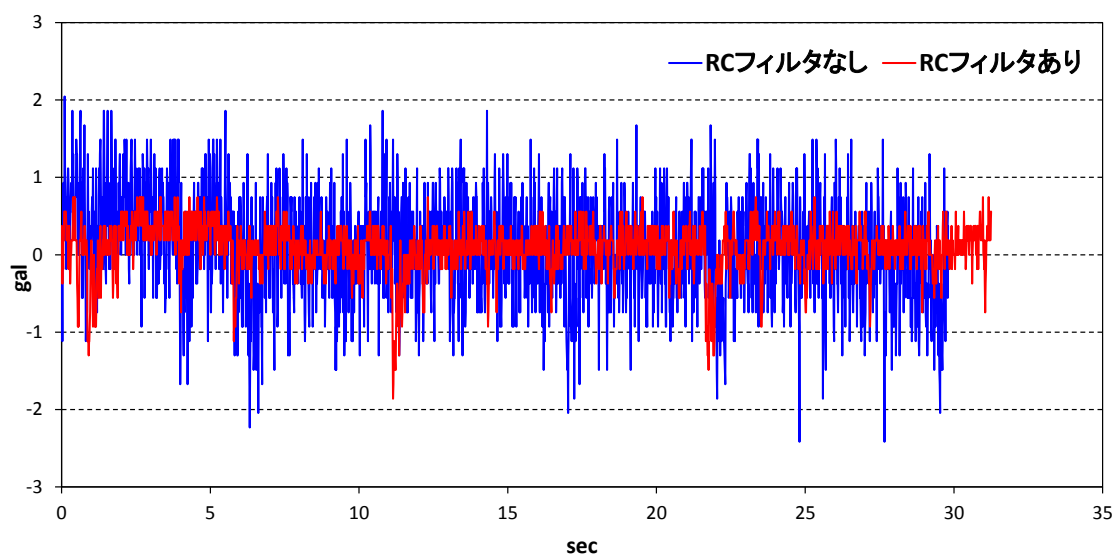


図 3-10 2 次 RC ローパスフィルタの有無によるノイズレベルの比較

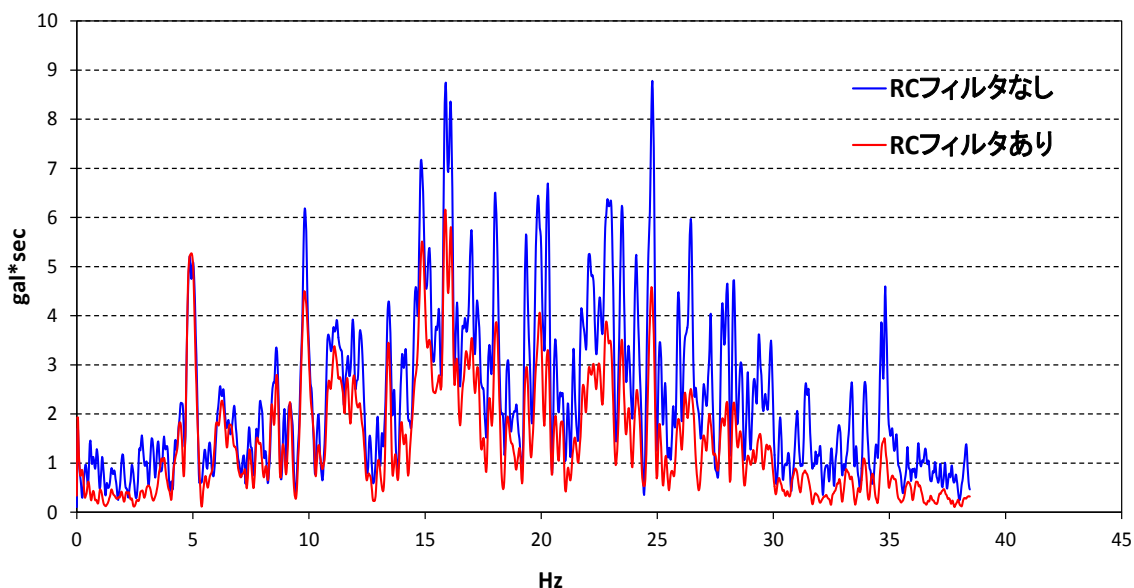


図 3-11 2 次 RC ローパスフィルタの有無によるフーリエスペクトルの比較

以上の二つの対策を合わせた結果を図 3-12 に、各対策による標準偏差を表 3-3 に示す。二つの対策を組み合わせることによって、ノイズレベルは最大 1gal 程度に低減し、標準偏差についても何も対策を施していないものと比べて、約 1/3 になることがわかった。

表 3-3 各対策による標準偏差の比較

	対策なし	KXR 4つ	KXR 1つ RCあり	対策あり
標準偏差	0.664	0.528	0.311	0.232

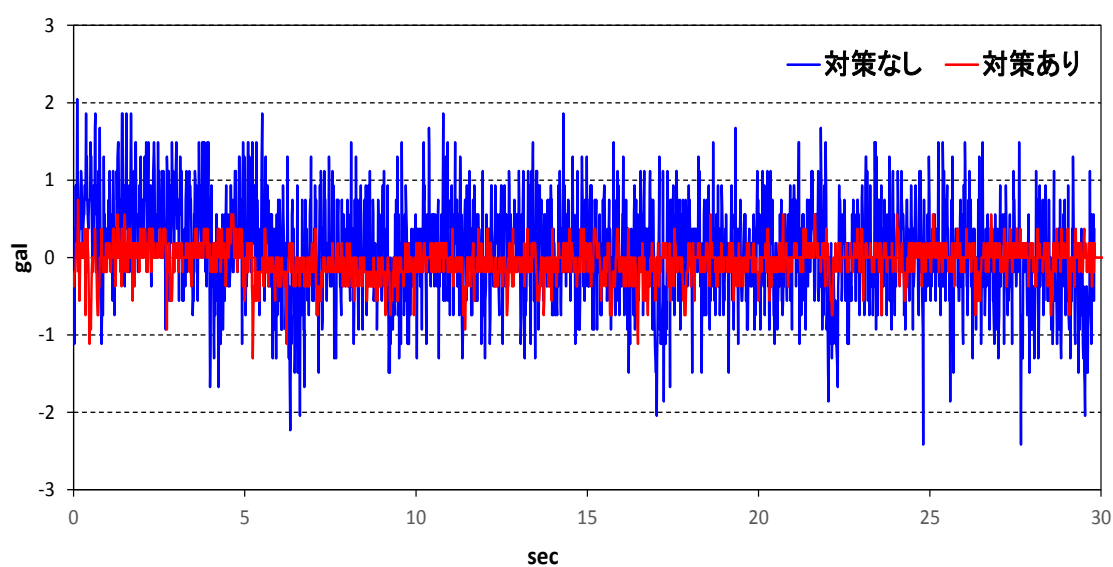


図 3-12 二つの対策によるノイズレベルの低減

3.3 ローコスト地震計のデータ収集方法の概要

ローコスト地震計のデータ収集方法について述べる。

3.3.1 ローコスト地震計のデータ収集方法

既存の地震計の多くは、水平 2 成分と鉛直 1 成分の加速度をそれぞれ決まった周波数（100Hz 等）で観測し、その観測波形を全て保存する。ローコスト地震計において、観測波形を全てクラウドサーバに送信するためには、全てのデータを一時的に保存しておく必要がある。しかし、ローコスト地震計を制御している **Arduino Uno** のメモリ容量は非常に小さく、観測波形全てを保存することができない。

そこで、本研究では、ローコスト地震計で観測している水平 2 成分・鉛直 1 成分の加速度の 3 成分合成波形をリアルタイムで計算し、**2.0gal** より大きい値を観測した時点から 2 分間の最大値のみをクラウドサーバに送信する。図 3-11 に観測のフローチャートを示す。初期設定では、3G シールドの **SIM** カード番号の設定や加速度センサのサンプリングレートやフルスケールの設定を行う。また、ローコスト地震計では、加速度の平均が **0gal** からずれることがあるため、起動時に加速度を 10,000 回計測し、その値の平均を加速度から引くことで基線補正を行っている。オフセットでは、加速度を 10,000 回計測し、その平均値の算出を行っている。これらのことにより、波形データを全て保存することなく、即時的に最大加速度値を把握することができる。3 成分合成値は以下の式で求める。

$$\text{三成分合成値} = \sqrt{\{(NS成分)^2 + (EW成分)^2 + (UD成分)^2\}}$$

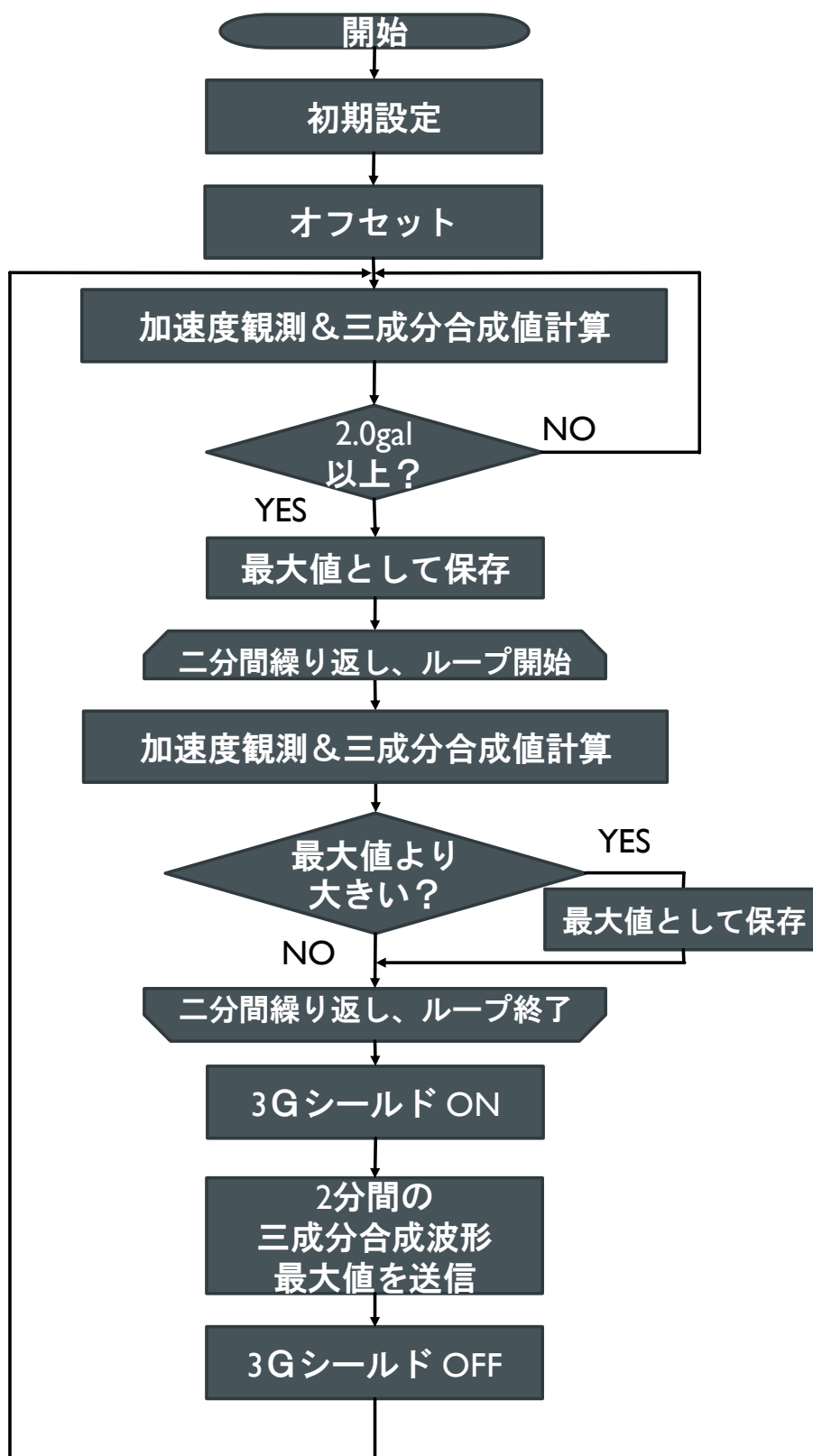


図 3-12 観測フローチャート

3.3.2 計測震度と 3 成分合成波形最大値の相関

3 成分合成波形は計測震度を算出する際にも利用される。しかし、本研究では 3 成分合成波形の最大値のみを送信するため、一般的によく用いられている計測震度を取得することができない。そこで、3 成分合成波形の最大値と計測震度の相関関係について検討した。以下に気象庁による計測震度の算出方法（気象庁 HP (http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm)より引用）を示す。

1. デジタル加速度記録 3 成分（水平動 2 成分、上下動 1 成分）のそれぞれの フーリエ変換を求める。
 2. 地震波の周期による影響を補正するフィルターを掛ける。
 3. 逆フーリエ変換を行い、時刻歴の波形に戻す。
 4. 得られたフィルター処理済みの 3 成分の波形をベクトルの的に合成する。
 5. ベクトル波形の絶対値がある値 a 以上となる時間の合計を計算したとき、これがちょうど 0.3 秒となるような a を求める。
- 6.5. で求めた a を、 $I = 2 \log a + 0.94$ により計測震度 I を計算する。計算された I の小数点第 3 位を四捨五入し、小数点第 2 位を切り捨てたものを計測震度とする。

そこで本研究では、3 成分合成波形の最大値を気象庁の計測震度算出に使用される下線の式の a に代入し、簡易的に計測震度を計算する方法を考案し、これを利用して計測震度と 3 成分合成波形の最大値の相関関係の検討を行った。

(1) 検証方法

既存の地震計（CV-374（東京測振製））を簡易振動台の上に載せ、手動で振動を起こし、大小様々な大きさの振動 41 ケースの加速度を有線で記録した。CV-374 は小型サーボ型加速度計であり、測定範囲は $\pm 2G$ 、感度は 10mgal 以下、観測周波数は 100Hz である。得た加速度波形を本研究の方法と気象庁の方法でそれぞれ計測震度を算出し、比較した。

(2) 検証結果

図 3-12 に検証結果を示す。気象庁の方法に対して本研究の方法は全体的に大きくなる結果になった。これは気象庁の方法では、ベクトル波形の絶対値がある値 a 以上となる時間の合計を計算したとき、これがちょうど 0.3 秒となるような a を利用しているため、最大値よりも小さな値になることは当然である。しかし、相関係数は 0.975 と高い値を示した。このことから、3 成分合成波形最大値は計測震度と高い相関があることがわかった。

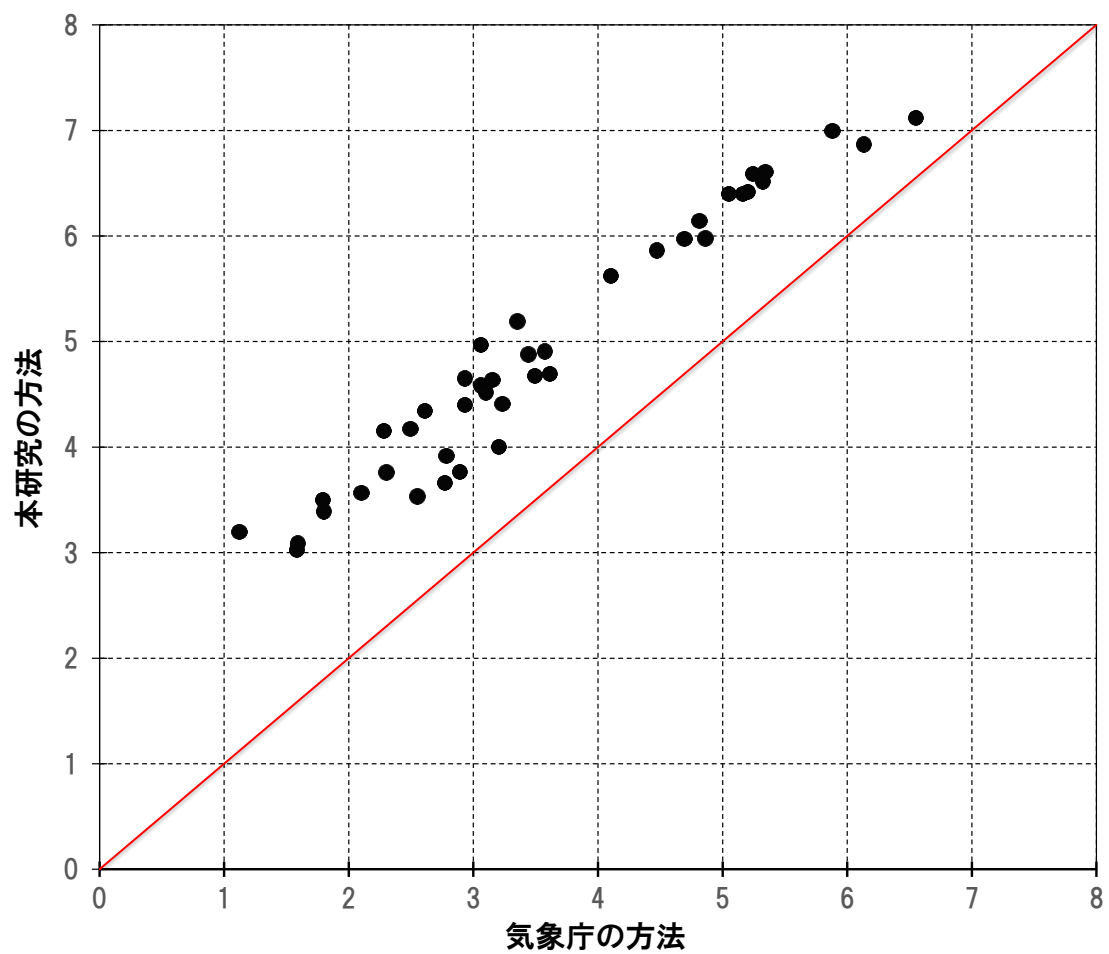


図 3-13 計算手法の違いによる計測震度の比較

第4章 ローコスト地震計と従来型地震計との比較実験

本章では、ローコスト地震計と従来型地震計（東京測振社製、CV-374）との比較実験を行い、従来型地震計を基準として、ローコスト地震計の精度を評価した。

4.1 実験概要

①実験場所：（株）山小電機製作所

②実験日時：2014年12月4日（木）13時～

③実験機器：ローコスト地震計 2台

CV-374(東京測振製)

スペックを表4-1に示す。

④実験方法：1ケースにつき、約2分間

振動台が動作している状態から観測を開始し、振動台が停止後、観測を終了する。

⑤実験ケース一覧：周波数 1.0Hz 加速度 10.0, 50.0, 150.0gal

周波数 3.0Hz 加速度 10.0, 50.0, 150.0gal

周波数 5.0Hz 加速度 10.0, 50.0, 150.0gal

周波数 10.0Hz 加速度 10.0, 50.0, 150.0gal

表 4-1 地震計スペック比較表

	ローコスト地震計	CV-374
加速度計	MEMS型加速度センサ	小型サーボ型加速度計
測定範囲	±2G	±2G
感度	0.186gal	0.01gal以下
A/D分解能	16bit	24bit
サンプリング	約80Hz	100Hz
記録成分	水平2成分上下1成分	

実験はローコスト地震計2台と従来型地震計（CV-374(東京測振製)）をともに有線で接続し、図4-1のように振動台に載せ、振動させた。ローコスト地震計は約80Hz、従来型地震計は100Hzでそれぞれ水平2成分、鉛直1成分の連続した加速度データを観測する。データの取り込みは、ローコスト地震計はターミナルエミュレータ TeraTerm のログ機能を使用し、従来型地震計は（株）東京測振のリアルタイムデータ受信プログラム RTD を用いた。

振動台は、図4-2のように周波数と加速度レベルを設定することができ、図4-1の矢印の方向に正弦波で振動する。しかし、振動台の設定値と実際の振動挙動に多少の誤差があるため、今回は従来型地震計と同時に観測し、従来型地震計と比較することによって、ローコスト地震計の精度を確かめた。

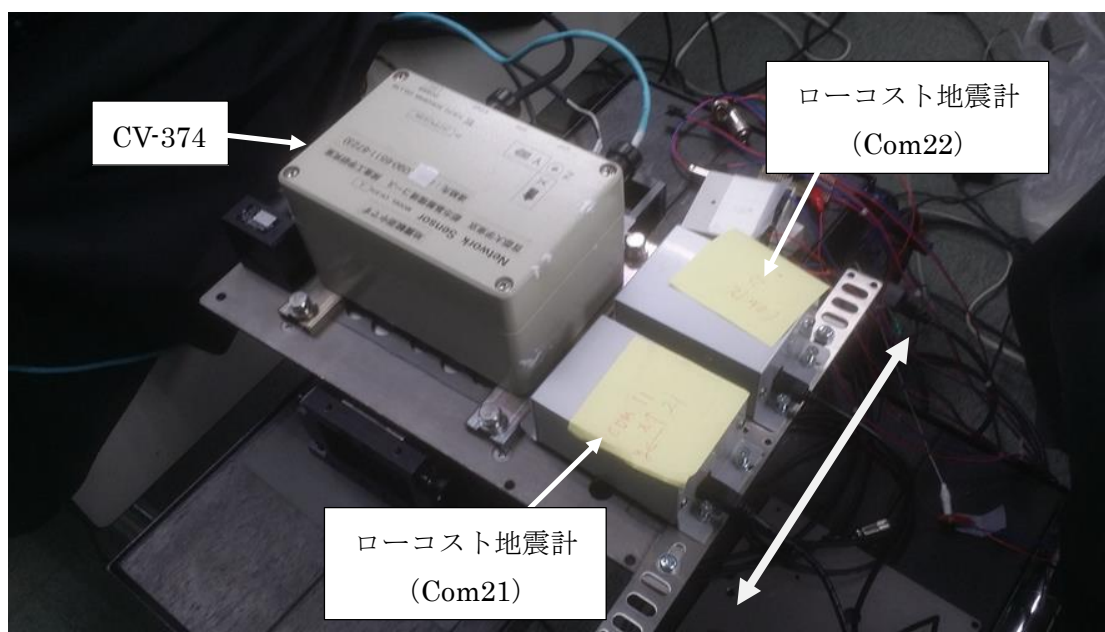


図 4-1 振動台実験の様子



図 4-2 振動台の数値設定の様子

4.2 実験結果

得られた加速度波形からローコスト地震計（図 4-1 の手前から順番に com21,com22 とする）と従来型地震計（CV-374）それぞれの三成分合成波形最大値計算し、その比を図 4-3～4-5 に示す。縦軸は比であり、1 に近いほど従来型の値と一致していることを示している。横軸は振動台で設定した周波数である。振動台の最大加速度の設定値ごとにまとめてあり、図 4-3 から 10gal,50gal,150gal となっている。図 4-6 にはローコスト地震計同士の三成分合成波形最大値の比を示す。また、観測した加速度波形を図 4-7～4-18 に示す。

三成分合成波形の最大値は本研究のローコスト地震計がクラウドに送信するデータである。そのため、ローコスト地震計の運用において、この値の精度が重要となる。実験結果より、既存の地震計との誤差は大きくても 20%程度であった。最大加速度別にみると最大加速度が大きくなるにつれて、誤差が小さくなる傾向にあった。また、周波数別にみると、10Hz は他の周波数に比べて、小さくなる傾向になった。そこで、それぞれの加速度波形を比較すると、1,3,5Hz はよく一致しているが、10Hz は従来型に対して明らかにローコスト地震計が小さな値を示していることがわかった。これは、2 次 RC ローパスフィルタの影響であることが考えられる。このことから、2 次の RC ローパスフィルタは地震動の主な周波数成分を残し、ノイズをカットしていることがわかる。

また、ローコスト地震計同士の誤差は大きくとも 10%程度であった。

4.3 まとめ

本章では、ローコスト地震計と従来型の地震計との比較実験を行い、ローコスト地震計の精度の確認を行った。

ローコスト地震計の三成分合成波形最大値の誤差は 10gal 前後の小程度の地震に対して、大きくとも 20%の誤差であり、50gal,150gal 前後の強い地震に対しては誤差が小さくなる結果になった。これは MEMS 型加速度センサ自体のノイズがあり、最大で 2gal ほどの誤差がでるため、10gal 前後の小程度の地震に対しては 20%の誤差が生じたと考えられる。また、2 次 RC ローパスフィルタは地震動の主な周波数成分を残し、ノイズをカットできていることがわかった。1,3,5Hz の加速度波形は従来型の地震計とよく一致していることが確認できた。

ローコスト地震計同士の三成分合成波形最大値の誤差は、大きくとも 10%であった。このことからローコスト地震計で複数個同時に観測した場合に 10%以上の差があれば、その地点同士で差が生じたと言える。

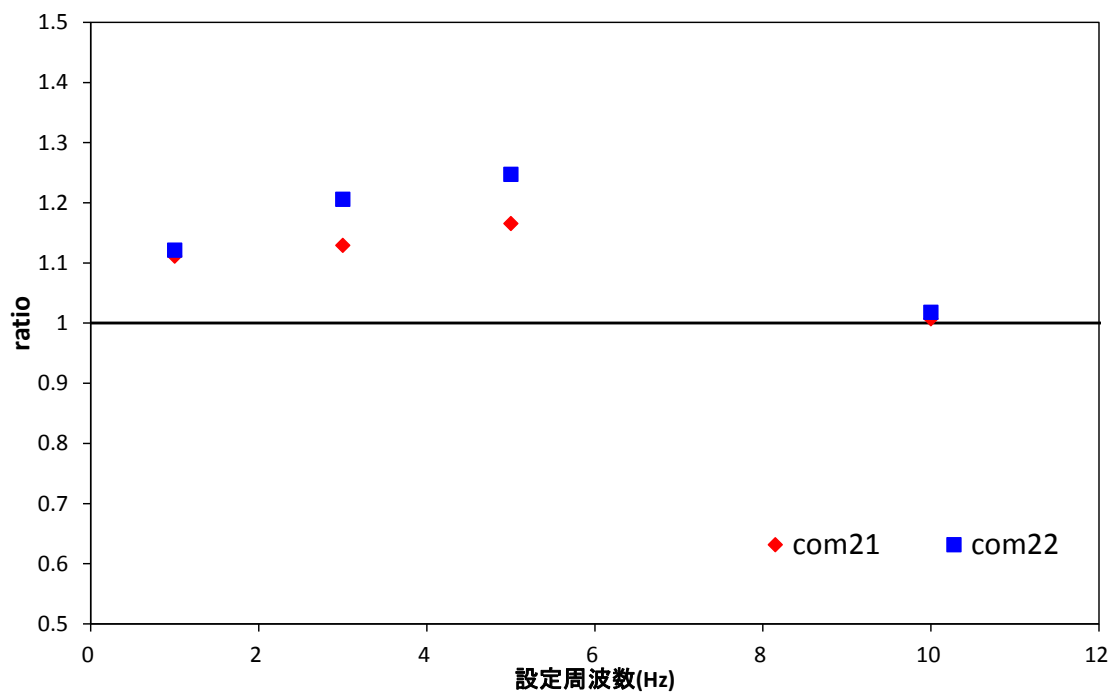


図 4-3 三成分合成波形最大値の従来型に対する比 10gal

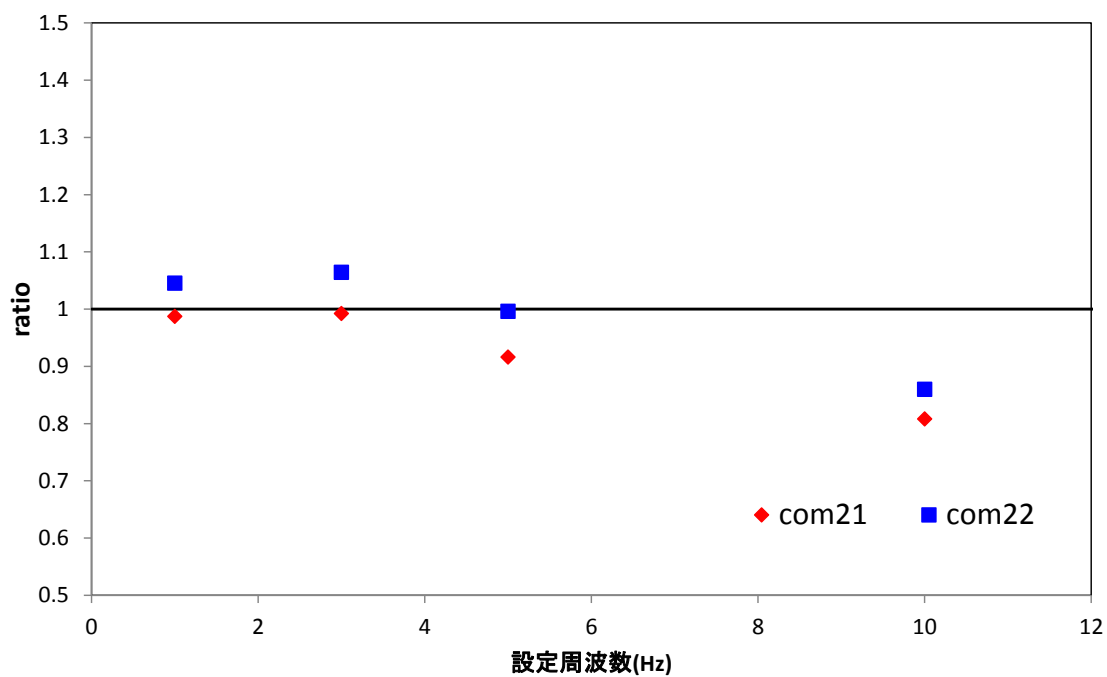


図 4-4 三成分合成波形最大値の従来型に対する比 50gal

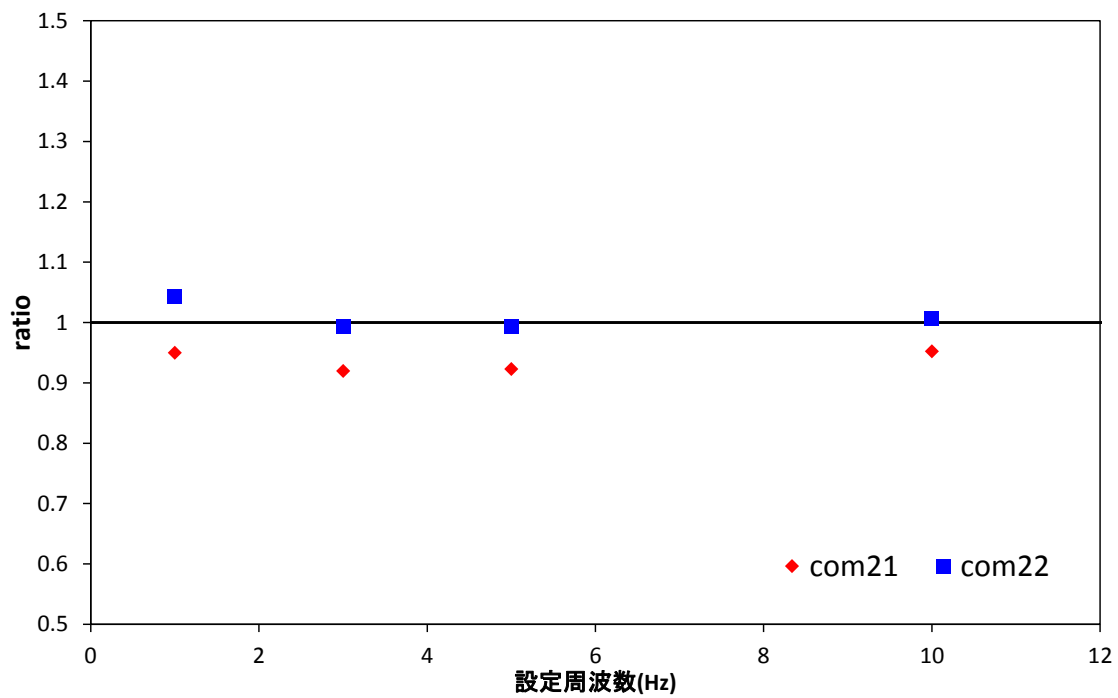


図 4-5 三成分合成波形最大値の従来型に対する比 150gal

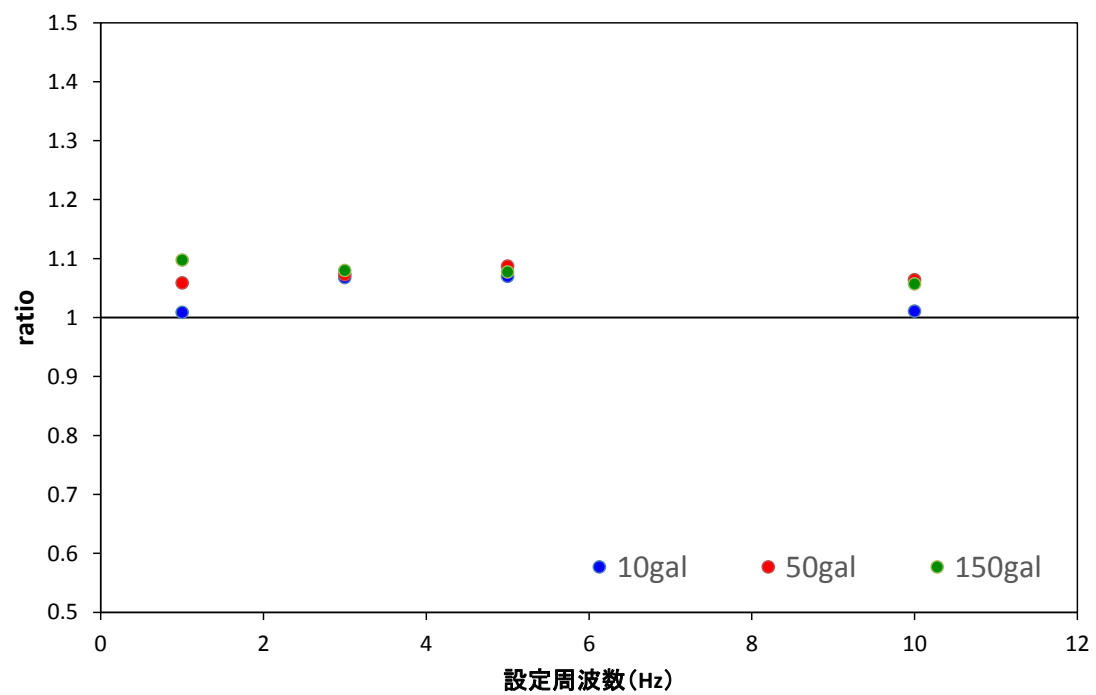


図 4-6 三成分合成波形最大値のローコスト地震計同士の比 com22/com21

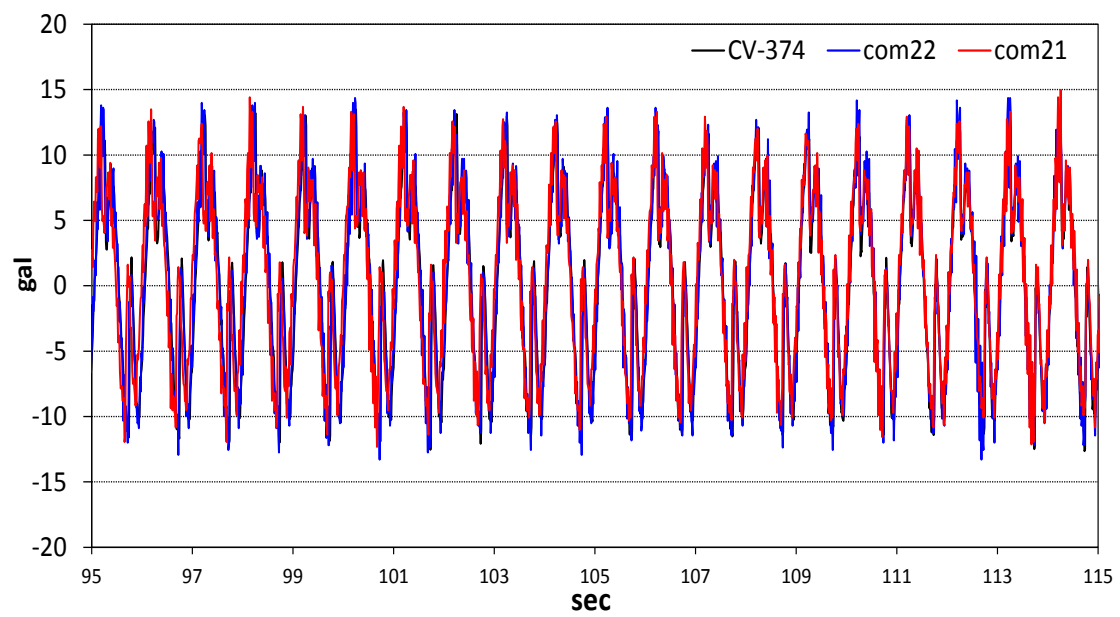


图 4-7 加速度波形 (10gal-1Hz)

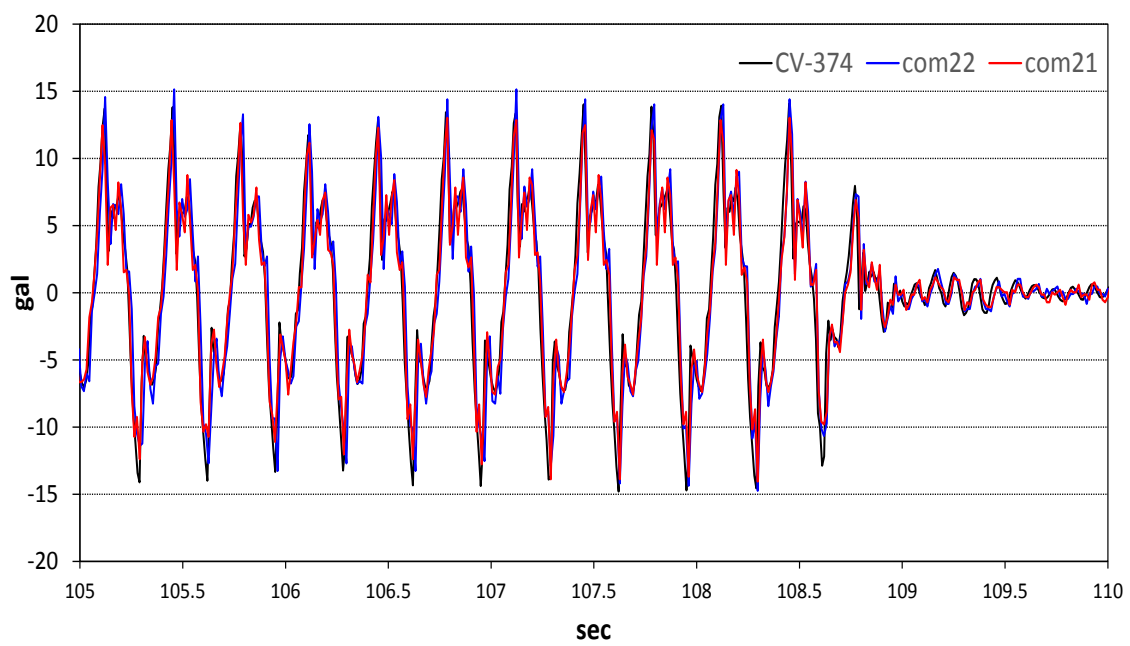


图 4-8 加速度波形 (10gal-3Hz)

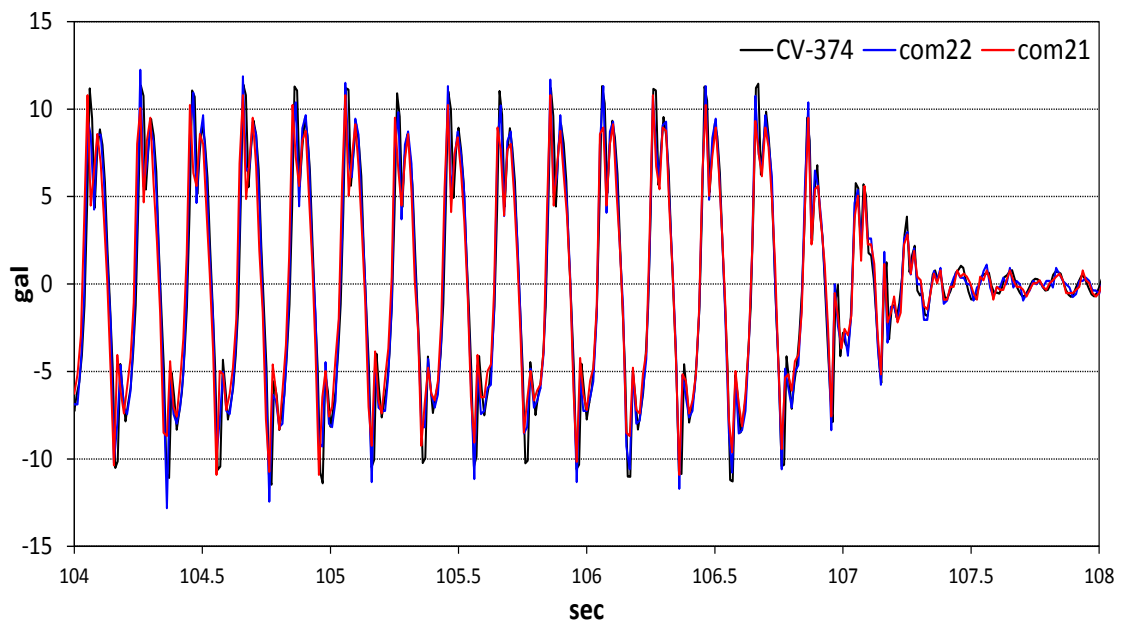


图 4-9 加速度波形 (10gal-5Hz)

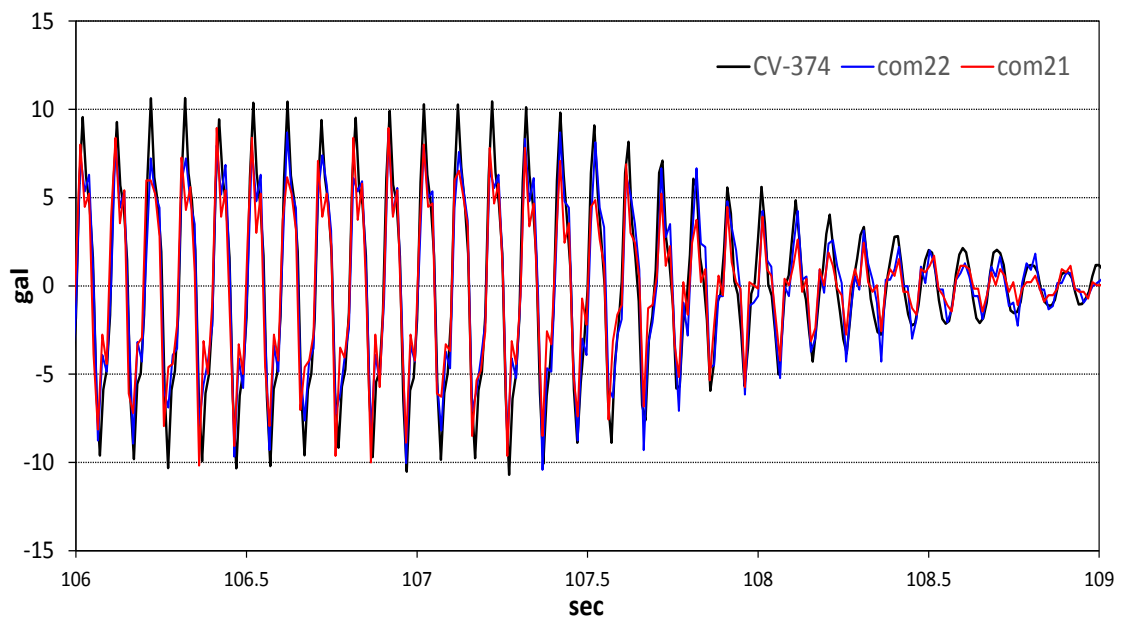


图 4-10 加速度波形 (10gal-10Hz)

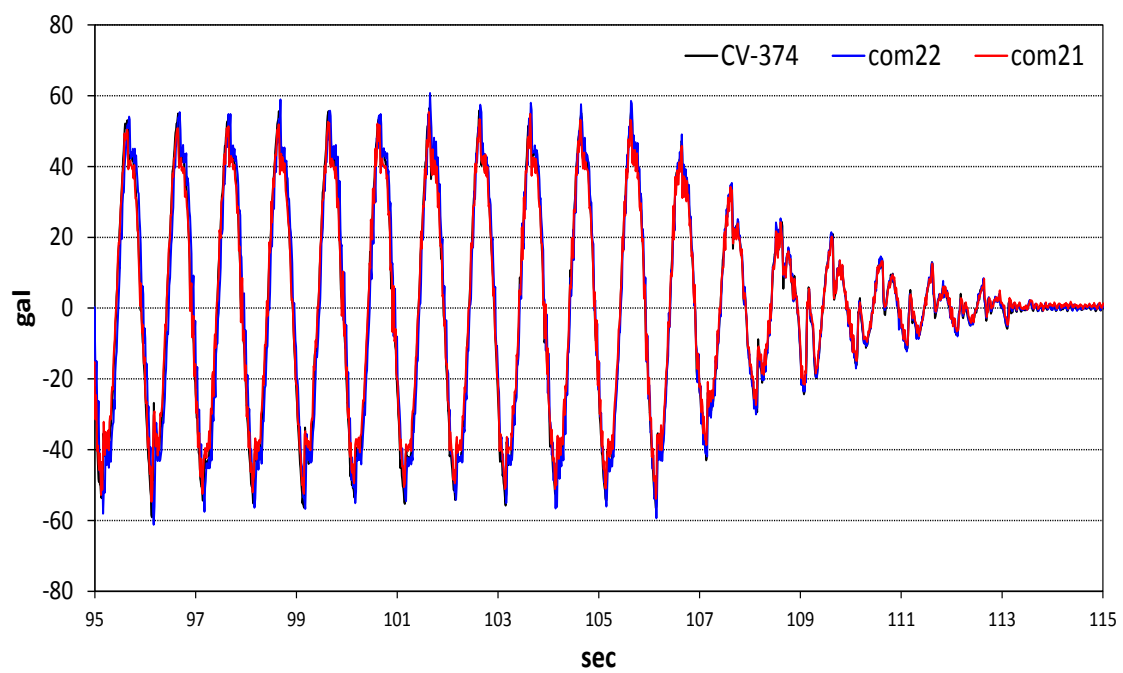


图 4-11 加速度波形 (50gal-1Hz)

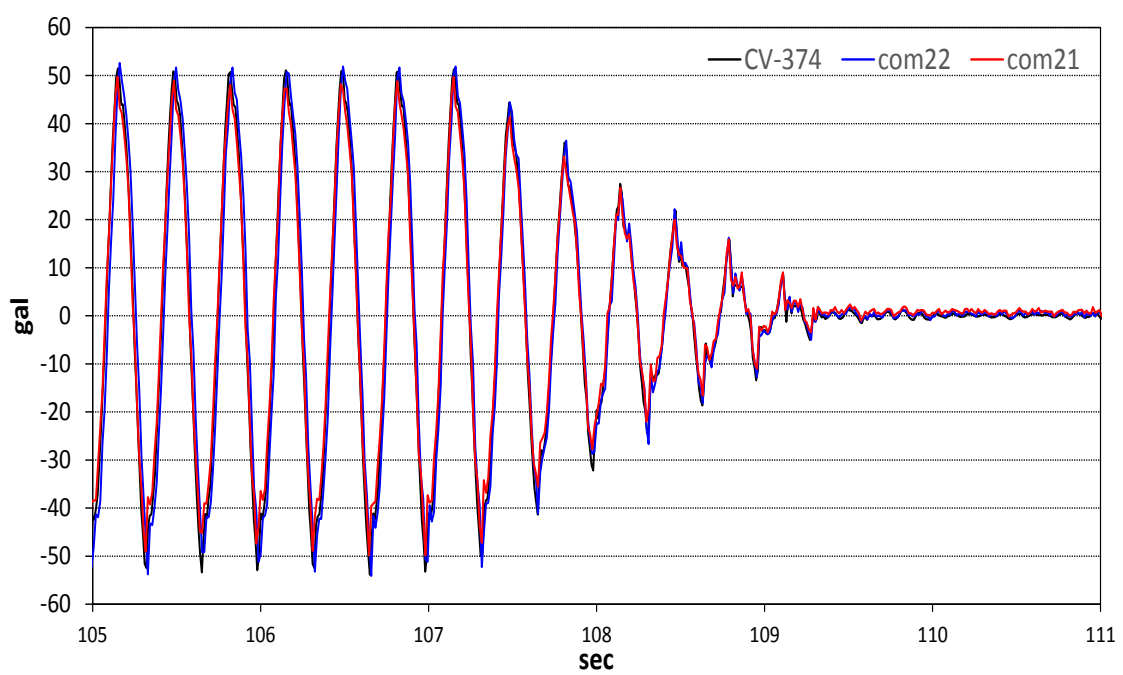


图 4-12 加速度波形 (50gal-3Hz)

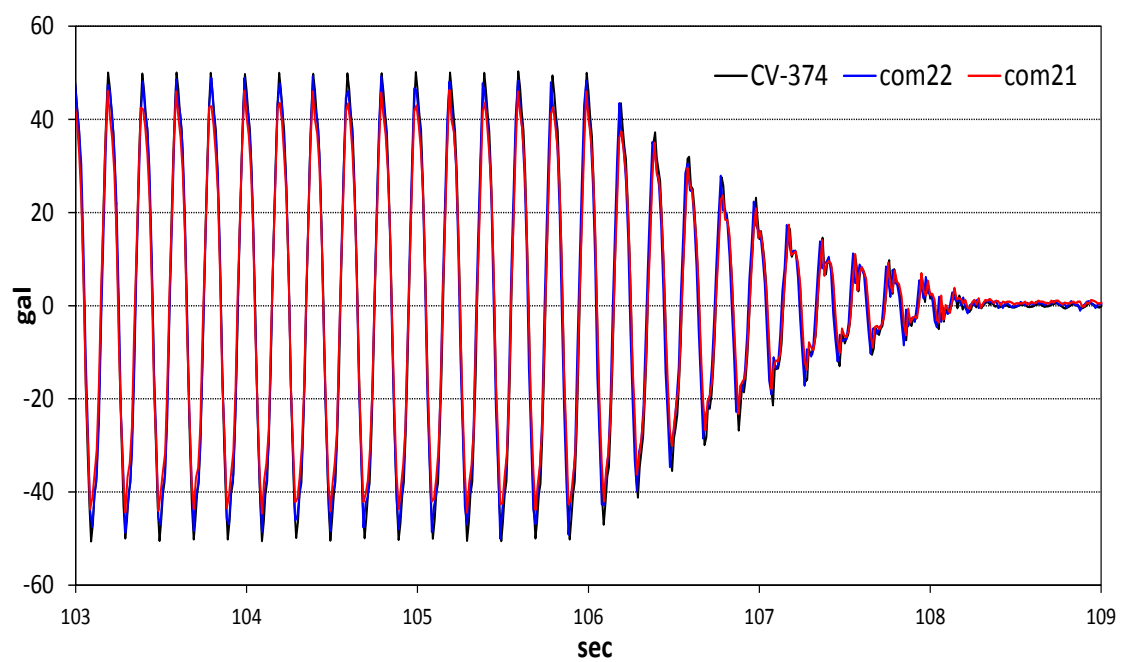


图 4-13 加速度波形 (50gal-5Hz)

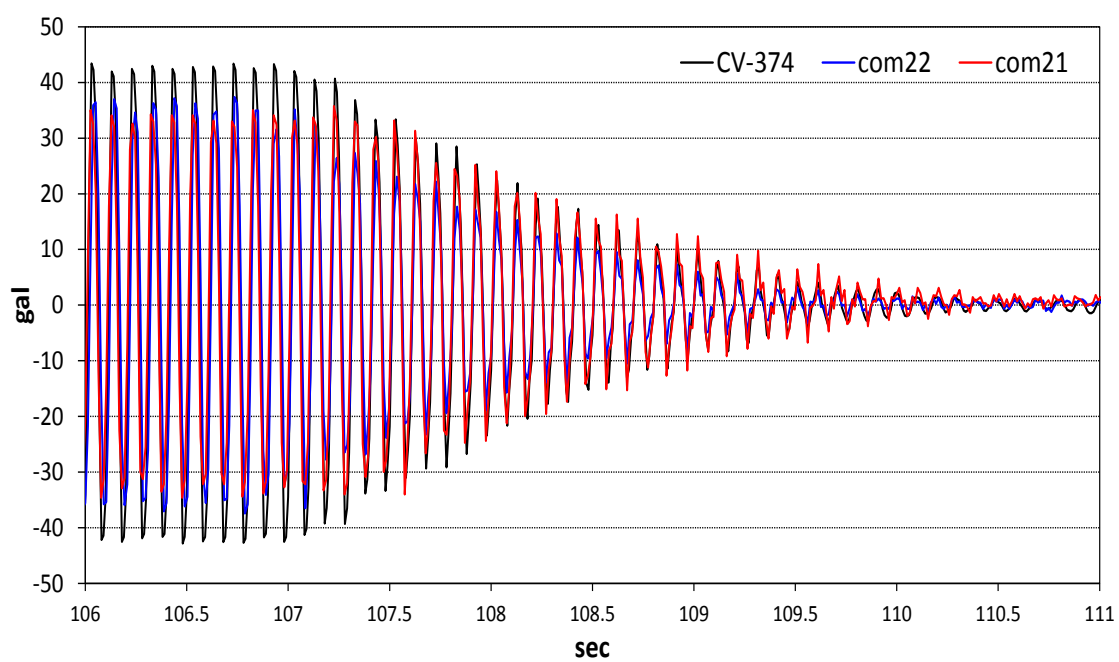


图 4-14 加速度波形 (50gal-10Hz)

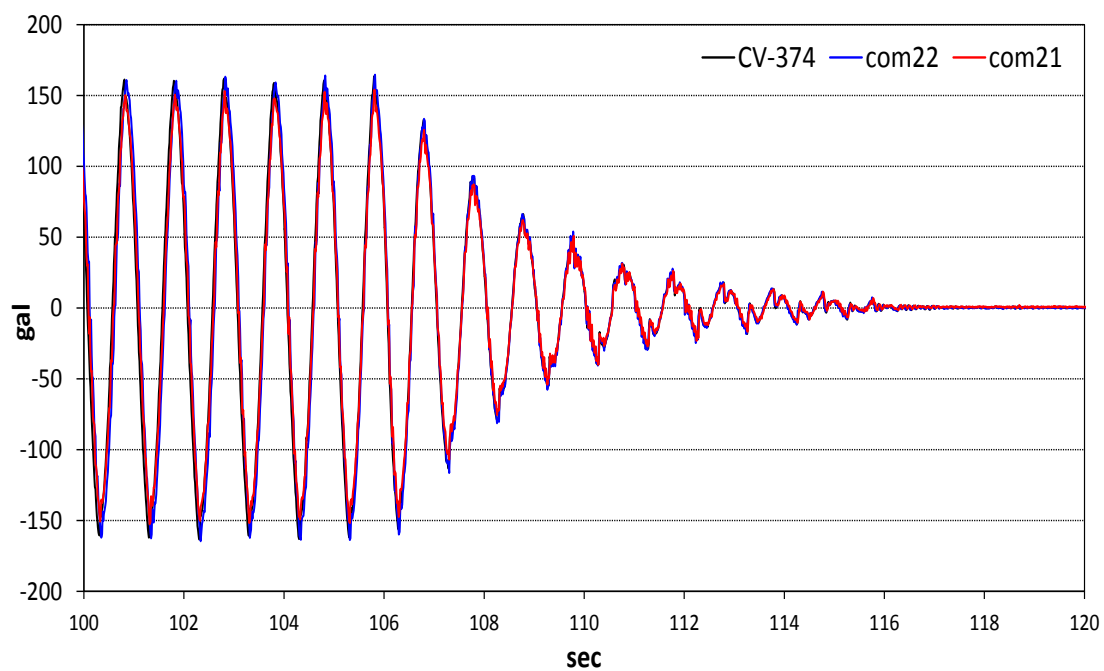


図 4-15 加速度波形 (150gal-1Hz)

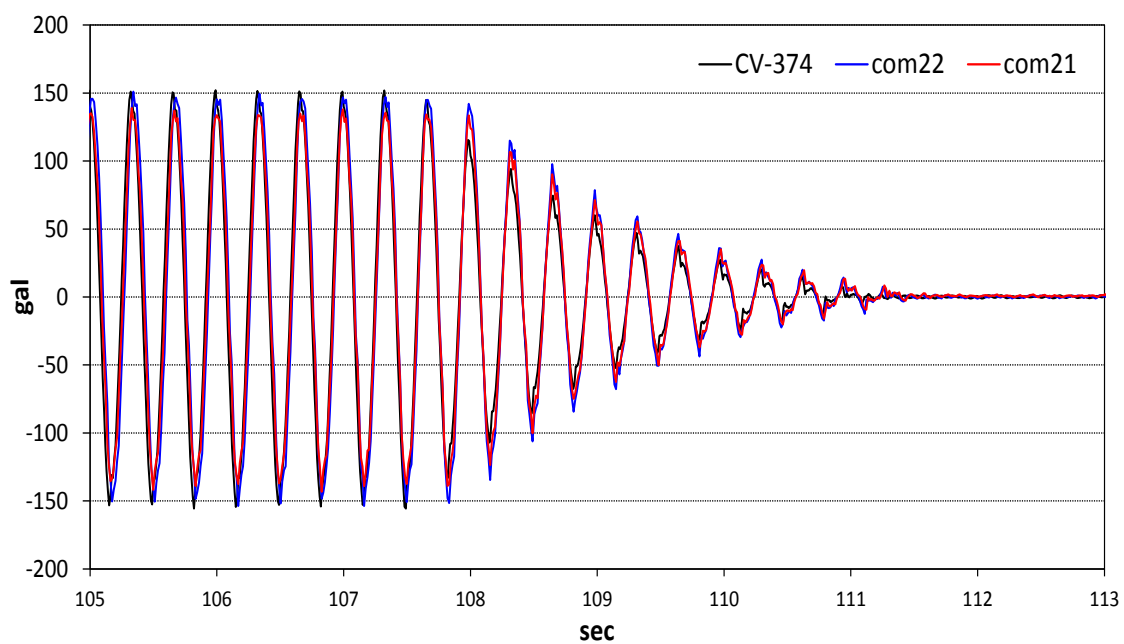


図 4-16 加速度波形 (150gal-3Hz)

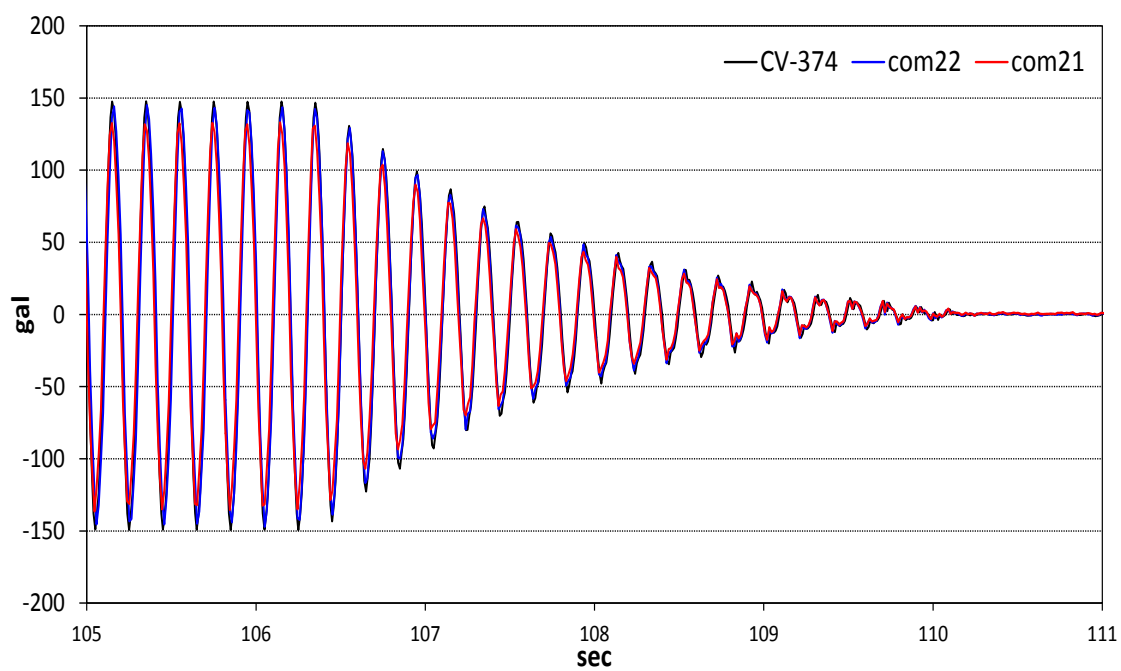


図 4-17 加速度波形 (150gal-5Hz)

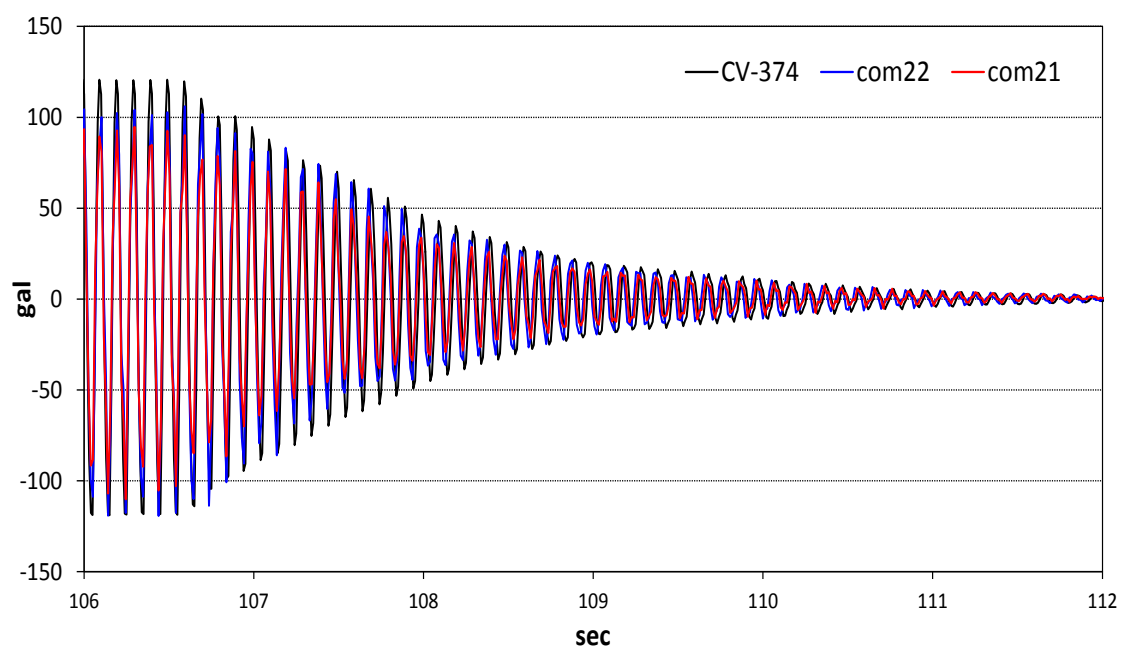


図 4-18 加速度波形 (150gal-10Hz)

第5章 ローコスト地震計を用いた自然地震観測

本章では、地震動の局所的な変化を検出するため、ローコスト地震計を用いて超高密度地震観測を行った。

5.1 観測概要

一般的に地震被害想定は 250m メッシュ単位で行われることが多く、この場合、メッシュ内の地震動は一定として扱われる。実際に防災科学技術研究所によって 2005 年から運用されている「地震ハザードステーション J-SHIS」より公表されている「全国地震動予測地図」(図 5-1)においても、250m メッシュ単位で情報が整理されている。「全国地震動予測地図」は 250m メッシュの全国版「確率論的地震動予測地図」、主要断層帯で発生する地震に対する詳細な強震動予測に基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」、それら計算に用いた全国版深部地盤モデル、250m メッシュ微地形分類モデルなどを一元的に管理し、背景地図と重ね合わせて、わかりやすく提供しているシステムである。

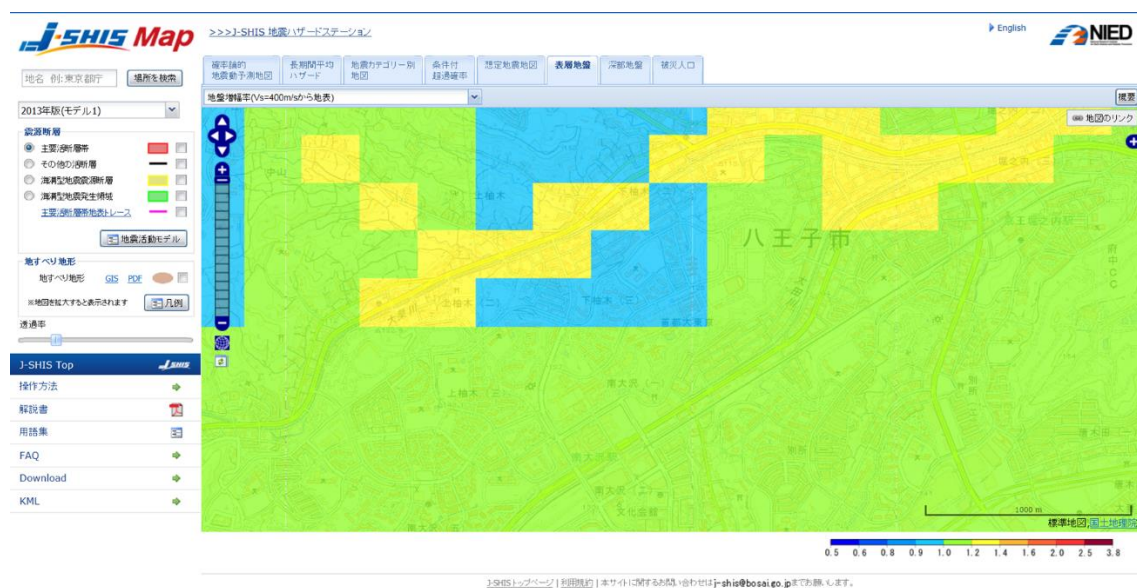


図 5-1 J-SHIS 全国地震動予測地図

そこで、本研究では多くの被害想定上は同一の地震動として扱われる 250m メッシュの範囲内に 3 つのローコスト地震計を設置し、実測した加速度の差異を検出することにより、超高密度観測の有用性の検討を行う。2014 年 12 月 14 日（日）16 時頃から観測を行っている。観測場所は、首都大学東京 9 号館の周辺（図 5-2）である。ローコスト地震計は個体の区別の都合上、com10,com12,com13 としている。表 5-1 に各ローコスト地震計の北緯、東経を示す。また、設置時のローコスト地震計の様子を図 5-3～5-5 に示す。また、首都大学東京広場 B に常設の地震計が設置しており、1gal 以上を観測するとトリガーが掛かり観測するようになっている。この地震計との比較も行う。

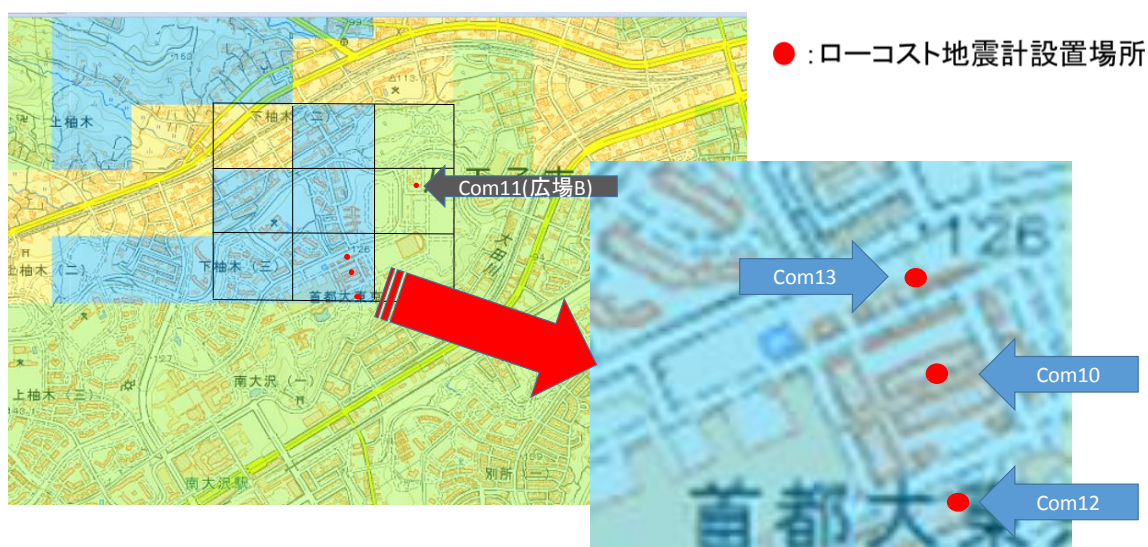


図 5-2 観測点位置図

表 5-1 各ローコスト地震計の北緯、東経

	北緯(度)	東経(度)
com10	35.620824	139.38346
com12	35.620183	139.38351
com13	35.621325	139.38321

(a)



(b)



図 5-3 ローコスト地震計(com10)の設置の様子
遠景 (a) 近景 (b)

(a)



(b)



図 5-4 ローコスト地震計(com12)の設置の様子
遠景 (a) 近景 (b)

(a)



(b)



図 5-5 ローコスト地震計(com13)の設置の様子
遠景 (a) 近景 (b)

5.2 観測結果

2015年1月30日20:31に茨城県南部で発生したM4.7の地震を観測することができた。観測結果を図5-6に示す。最大加速度値は小さいものでcom12の2.15gal、大きいものでcom10の2.59galであり、差は0.44gal、約20%程度の差が発生した。ローコスト地震計の標準偏差は0.232であり、最大加速度の差が標準偏差を上回っていることから、250mメッシュの範囲内で局所的な変化を確認することができた。また、広場Bの地震計は1galのトリガーが掛かっておらず、広場Bでの観測値は1gal以下であることがわかり、250mメッシュ外ではさらに大きな加速度値の差がみられた。J-SHISによって算出されている地盤増幅率を比較すると、ローコスト地震計3つが設置されている250mメッシュと広場Bが存在する250mメッシュはそれぞれ1.00、1.06であり、広場Bの方が大きく揺れることを示している。しかし、実際には広場Bの方が小さい加速度であり、逆の結果となった。このような現象は250mメッシュによる予測では評価することができない。これらのことから、実測を行うことは重要であり、超高密度地震観測網は有用であると考えられる。

今後、さらに観測データを蓄積し、複数の例をもととして、さらなる検討が必要であると考えている。



図 5-6 2015 年 1 月 30 日 20 : 31 発生地震観測結果

5.3 まとめ

本章では、ローコスト地震計を用いた自然地震観測を行い、超高密度地震観測の有用性について検討した。

1 ケース観測し、250m メッシュ内でローコスト地震計の誤差以上の加速度値の差を確認した。このことは 250m メッシュ内で地震動は局所的に変化していることを示しており、超高密度地震観測は有用であることを確認した。

また、広場 B に設置している地震計との比較を行い、J-SHIS による 250m メッシュの地盤増幅率の予測と逆の結果を得たことから、予測と実際に挙動とは異なる現象が発生することを確認した。

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究では、超高密度地震観測網実現のために、コストを従来型地震計の約 1/20 に抑えたローコスト地震計の開発を行った。

ノイズレベルが高い MEMS 型加速度センサに対して、センサ数を増やすことや 2 次の RC ローパスフィルタを利用することでノイズを約 1/3 に低減することができた。

ローコスト地震計と従来型地震計との比較実験を行い、加速度波形は従来型とよく一致していることがわかった。また、三成分合成波形最大値の誤差は小規模地震に対して、高々 20% であり、中・大規模の地震に対してはさらにより精度を持つことが確認できた。

ローコスト地震計を用いた自然地震観測を行い、250m メッシュ内でローコスト地震計の誤差以上の加速度値の差を確認した。このことは 250m メッシュ内で地震動は局所的に変化していることを示しており、超高密度地震観測は有用であることを確認した。

6.2 今後の課題

三成分合成波形最大値だけでなく波形を保存することができればより詳細な振動の違いをみることが出来るため、メモリ増設し波形すべてを保存する機能を追加することや、ローコスト地震計を用いた自然観測を継続して行い、観測データを蓄積することによって、さらに詳しく有用性の検討をすることがあげられる。

参考文献

- 1). 須貝健吾(2012)「超高密度地表加速度描画システム構築のための小型地震計の開発」
首都大学東京修士論文
- 2). 小田義也, 戸田雄太郎: 東北地方太平洋沖地震による石巻市桃生町の局所的な建物被害と微動 H/V, 物理探査学会, 第 64 巻, 第 6 号, 445-454 頁, 2011
- 3). 八幡啓, 山崎晴雄: 2007 年能登半島地震・新潟県中越沖地震および 2008 年岩手・宮城内陸地震における詳細建物被害分布と地役・地質的要因, 日本地理学会発表要旨集, 74、133、2008
- 4). 白馬村 HP 被害情報① - 人的被害・建物被害
(http://www.vill.hakuba.lg.jp/quake_nagano_north/damage/damage.html/)
- 5). 強震地震観測網 HP(<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)
- 6). 東京ガス HP 超高密度リアルタイム地震防災システム「SUPREME」
(http://www.tokyo-gas.co.jp/techno/stp3/97c1_j.html)
- 7). jishin.net HP jishin.net とは(<http://www.jishin.net/point.html>)
- 8). 田原淳一郎 (2010) Arduino で始める電子工作 8bit マイコンを活用するオープンプロジェクト Arduino の世界 株式会社カットシステム
- 9). 河連庸子・山崎文徳・神原健 (2012) Arduino スーパーナビゲーション しくみと応用テクニック 株式会社リックテレコム
- 10). 3G シールドアライアンス HP(<http://3gsa.org/>)
- 11). アナログ・デバイセズ社 HP ANJ-0005: 加速度センサーとは？
(http://www.analog.com/static/imported-files/jp/application_notes/ANJ-0005.pdf)
- 12). 気象庁 HP 計測震度の算出方法
(http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm)
- 13). J-SHIS HP J-SHIS について (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/about>)

データシート

①BMA180

<http://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/BST-BMA180-DS000-03.pdf>

②MMA8451Q

<https://strawberry-linux.com/pub/MMA8451Q.pdf>

③KXR94-2050]

<http://akizukidenshi.com/download/ds/kionix/KXR94-2050.pdf>

④ADS1115

<http://www.adafruit.com/datasheets/ads1115.pdf>

謝辞

本論文をまとめるにあたり、ご指導頂きました小田義也准教授、吉嶺充俊准教授、中村一史准教授、岩楯敏広先生、井上素行先生に深く感謝の意を表します。また、小田義也准教授には、研究全般にわたり、特に熱心なご指導を頂き、深く感謝申し上げます。

さらに、同研究室学生諸氏の様々な協力に対しても、深く御礼を申し上げます。

また、振動台実験の際に実験設備や実験機会を与えていただいた時空間認識研究所の八巻和幸氏、(株)山小電機製作所の方々にも深く感謝申し上げます。

最後に、本研究成果をこのような形にまとめられたことをご報告するとともに、ご協力いただきました全ての方々に感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。

2015 年 2 月 鈴木宏伸

付録

- ・使用した Arduino Sketch

```
//sketch for 3G  trigar zishinkei

#include<Wire.h>
#include<ctype.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include "a3gs.h"
#include <math.h>
#include "ADS1115.h"

//3gshield setup
const char *server = "api.xively.com";
const char *path =
"v2/feeds/1583722091/datastreams/com10?_method=put";
const char *header="X-
ApiKey:Nx5HifRNCuomDNuLyHou3RE4ESoMgMfDUn564niDEOpoGIHi
$r$nContent-Type: text/csv$r$n";
int port = a3gsDEFAULT_PORT;

char res[50];
char body[20];
int len;

#define SAMPLEN 512
ADS1115 adc0(ADS1115_DEFAULT_ADDRESS); //ADDR:GND

double st;//SAMPLEN 個のサンプリングに要した秒数
```

```

double u[SAMPLEN][3];//測定値を SAMPLEN 個保存
int k[3];//3 軸の測定値が揃うまで一時保存
double avex = 0.0;
double avey = 0.0;
double avez = 0.0;
double (*fx)[2];//時間軸サンプル
double (*fy)[2];
double (*fz)[2];

float max_gal=0.0;
float gousei_gal = 0.0;
int xively=0.0;

int i;
int m=0;

void setup();
void loop();

```

```

//KXR_ADS1115 ReadAccel
void readAccel(void){
    double tmpx,tmpy,tmpz;
    k[0]=adc0.getConversionP1GND();
    k[1]=adc0.getConversionP2GND();

```

```

k[2]=adc0.getConversionP3GND();

k[0]=(k[0]-avex);
k[1]=(k[1]-avey);
k[2]=(k[2]-avez);

}

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin(); // I2C 開始

  // 3G シールド設定
  if (a3gs.start() == 0 && a3gs.begin() == 0) {
    Serial.println("Succeeded.");
    int no;
    if (a3gs.getDefaultProfile(&no) == 0) {
      Serial.print("Default Profile Number is ");
      Serial.println(no);
    }

    no = 11; // for b-mobile
    if (a3gs.setDefaultProfile(no) == 0) {
      Serial.print("Set Default Profile Number as ");
      Serial.println(no);
    }
    else
      Serial.println("Failed.");
  }
}

```

```

//setup KXR
adc0.initialize(); // ADS1115 初期化
adc0.setMode(ADS1115_MODE_SINGLESHOT); // シングルショット・モード

//    adc0.setRate(ADS1115_RATE_475); // サンプルングレート 475sps
adc0.setRate(ADS1115_RATE_860); // サンプルングレート 860sps

//    adc0.setGain(ADS1115_PGA_2P048); // フルスケール±2.048V 1 bit
//    = 0.0625mV
adc0.setGain(ADS1115_PGA_4P096); // フルスケール±4.096V 1 bit =
//    0.125mV
//    adc0.setGain(ADS1115_PGA_6P144); // フルスケール±6.144V 1 bit
//    = 0.1875mV

fx = (double (*)[2])malloc(2 * SAMPLEN * sizeof(double));
fy = (double (*)[2])malloc(2 * SAMPLEN * sizeof(double));
fz = (double (*)[2])malloc(2 * SAMPLEN * sizeof(double));

Serial.println("Checking offset");
for (i=0; i<10000; i++) {
    k[2]=adc0.getConversionP3GND();
    k[1]=adc0.getConversionP2GND();
    k[0]=adc0.getConversionP1GND();
    avex=avex+k[0];
    avey=avey+k[1];
    avez=avez+k[2];
}

avex=avex/10000;
avey=avey/10000;
avez=avez/10000;
delay(100);

```

```
}
```

```
void loop()
{

    readAccel();

    gousei_gal =
sqrt(pow(k[0]*0.125*980.0/660.0,2.0)+pow(k[1]*0.125*980.0/660.0,2.0)+pow
(k[2]*0.125*980.0/660.0,2.0));

    // Rtc.available();
    if(gousei_gal > 2.0){
        max_gal=gousei_gal;

        for (m=1; m<9201; m++) {
            readAccel();

            gousei_gal =
sqrt(pow(k[0]*0.125*980.0/660.0,2.0)+pow(k[1]*0.125*980.0/660.0,2.0)+pow
(k[2]*0.125*980.0/660.0,2.0));

            if (gousei_gal > max_gal){
                max_gal=gousei_gal;

            }
        }
    }
}
```

```

if( m == 9200){

    Serial.println(max_gal,3);

    a3gs.start();
    a3gs.begin();

    //upload to xively
    len = sizeof(res);
    dtostrf(max_gal,7,3,body);

    Serial.println(body);

    if(a3gs.httpPOST(server,port,path,header,body,res,&len,true) ==
0){

    }
    else {
        Serial.println("xively.Failed");

Serial.println(a3gs.httpPOST(server,port,path,header,body,res,&len,true));
    }

    max_gal = 0;
    Serial.println("Shutdown..");
    a3gs.end();
    a3gs.shutdown();

}

```

```
    }  
    m=0;  
  }  
}
```


・使用部品一覧

使用部品名一覧	値段(円)
Arduino Uno SMD Rev3	3,240
Arduino用バニラシールド基板ver.2	400
3軸加速度センサモジュールKXR94-2050 × 4	3,400
ADS1115搭載 16BitADC	2095
積層セラミックコンデンサー 0.1μF50V × 3	12
絶縁型ラジアルリードタイプ積層セラミックコンデンサー 1μF50V × 3	30
金属皮膜抵抗 1/4W1kΩ × 3	9
USB充電ACアダプタ	216
USBケーブル Aオス-Bオス 1.5m	130
MBC型フランジ足付アルミケース MBC100507	832
3Gシールド	31,500
合計	41,864